Datenaufnahme und Datenanalyse im EDDA-Experiment

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der
Hohen Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Florian Schwandt
aus Bonn

Bonn, Januar 1995

Angefertigt mit Genehmigung der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Referent: Prof. Dr. J. Bisplinghoff
Korreferent: Prof. Dr. K. Kilian

Tag der mündlichen Prüfung:

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Proton-Proton-System im Energiebereich einiger GeV ist für das Verständnis der starken Wechselwirkung von fundamentaler Bedeutung. Während die Beschreibung der starken Wechselwirkung zwischen Nukleonen durch Mesonenaustausch im Bereich niederer Energien als erfolgreich angesehen werden kann, stellt sich bei höheren Energien und damit kleineren Abständen der Nukleonen die Frage, ob Quarkfreiheitsgrade in den Observablen sichtbar werden.

Aufgrund ihres grundlegenden Charakters ist hier insbesondere die elastische Proton-Proton-Streuung im Energiebereich einiger GeV relevant. Ein wichtiges Bindeglied zwischen Theorie und Experiment stellt dabei die Beschreibung der Streuung durch die *Streuphasen* dar. Sie liefern eine vollständige Beschreibung des Streuprozesses anhand vergleichsweise weniger Parameter. Mit ihrer Hilfe können Vorhersagen der theoretischen Modelle mit den experimentellen Observablen verknüpft werden. Für eine aussagekräftige Streuphasenanalyse ist jedoch aufgrund der möglichen Mehrdeutigkeiten des Verfahrens ein umfangreicher experimenteller Datensatz erforderlich. Nötig sind dabei vor allem nicht nur differentielle Wirkungsquerschnitte, sondern auch Polarisationsobservablen, die mit polarisiertem Strahl und bzw. oder Target gewonnen, unabhängige Informationen liefern.

Weiterhin gibt es zahlreiche theoretische Vorhersagen zu resonanten Zuständen im Proton-Proton-System, die sich in ihrer Lage unterscheiden [LOC86]. Der Nachweis dieser sogenannten *dibaryonischen Resonanzen* bietet eine weitere Möglichkeit, die Gültigkeit unterschiedlicher theoretischer Modelle zu überprüfen. Bei der Identifizierung möglicher Resonanzen und Bestimmung ihrer Quantenzahlen aus den Experimentdaten ist ebenfalls die Streuphasenanalyse zentrales Hilfsmittel.

Aufgrund der Interferenz zwischen resonanter und nichtresonanter Streuamplitude sollten diese Zustände auch im Falle schwacher Kopplung an den elastischen Kanal in der Anregungsfunktion als Exkursionen nachweisbar sein. Simulationen [HIN94] auf Grundlage von Streuphasenrechnungen [ARN83] zeigen, daß willkürlich angenommene Resonanzen in einzelnen Partialwellen mit Elastizitäten $\Gamma_{el}/\Gamma \geq 5\%$ in den Anregungsfunktionen sowohl für $d\sigma/d\Omega$ als auch für Spinkorrelationsparameter (z.B. A_{yy}) Exkursionen im Bereich von 10 – 30 % liefern (Abb. 1.1). Dabei erweisen sich die spinabhängigen Observablen i. allg. als sensitiver als der spingemittelte Wirkungsquerschnitt. Die Stärke des Effektes wird für $d\sigma/d\Omega$ beim Streuwinkel $\theta_{CM} = 90^o$ maximal, so daß dort selbst Resonanzen mit geringer Elastizität auffindbar sein sollten. Die Messung von Anregungsfunktionen mit hoher relativer Genauigkeit stellt daher zur Auffindung resonanter Strukturen ein empfindliches Hilfsmittel dar.

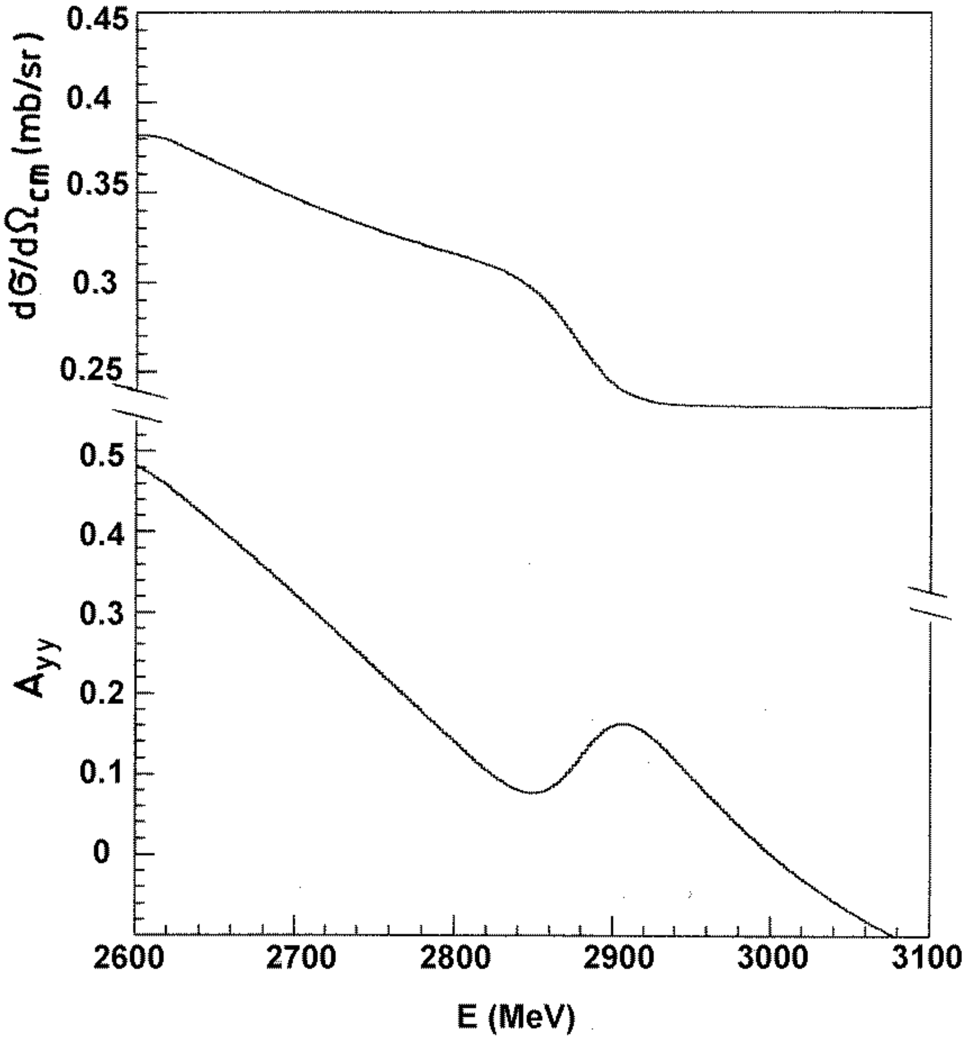


Abbildung 1.1: Simulierter differentieller Wirkungsquerschnitt (oben) und Spinkorrelationsparameter A_{yy} (unten) bei $\theta_{cm} = 90^o$ für eine willkürlich angenommene $^1D_2$-Resonanz bei $E_{res} = 2880$ MeV, $\Gamma = 100$ MeV, $\Gamma_{el} = 5$ MeV. [HIN94]

Trotz zahlreicher experimenteller Anstrengungen sind die verfügbaren Daten im Energiebereich oberhalb von etwa 1.2 GeV kinetischer Energie jedoch lückenhaft. Die weltweit existierenden Daten wurden aus dem Programm SAID [SAID93] extrahiert. Abb. 1.2 und Abb. 1.3 zeigen den Weltdatensatz für den differentiellen Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$ bei Streuwinkeln von $\theta_{CM} = 90^o$, 60^o und 30^o. Während für $\theta_{CM} = 90^o$ unterhalb von T = 1.2 GeV durch ein Experiment mit internem Target [GAR85] Umfang und Genauigkeit des Datensatzes deutlich verbessert werden konnte (ΔT = 6 MeV), sind Daten bei höheren Energien nur mit relativ großer Schrittweite verfügbar und hohem Fehler behaftet. Für Daten außerhalb des symmetrischen Winkels zeigen sich vor allem für höhere Energien große Abweichungen der einzelnen Messungen voneinander sowie teilweise nicht vermesse-

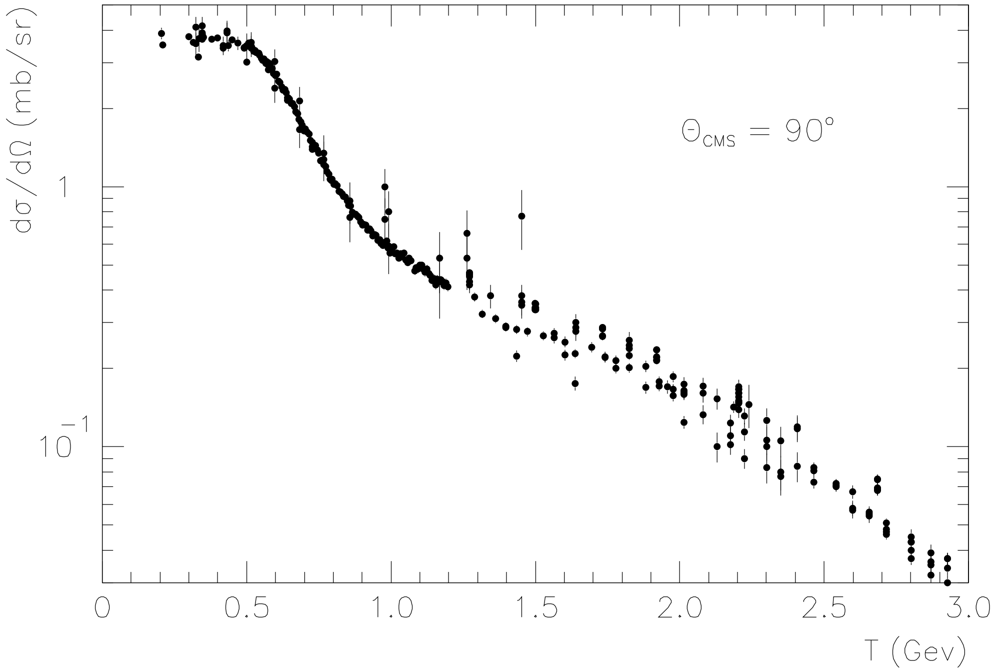


Abbildung 1.2: Weltdatensatz für den differentiellen Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$ bei $\theta_{cm} = 90^o$ im Energiebereich T $= 0.2 - 3.0$ GeV. Die Daten unterhalb von 1.2 GeV stammen von einem Experiment mit internem Target [GAR85] (aus [WIE94])

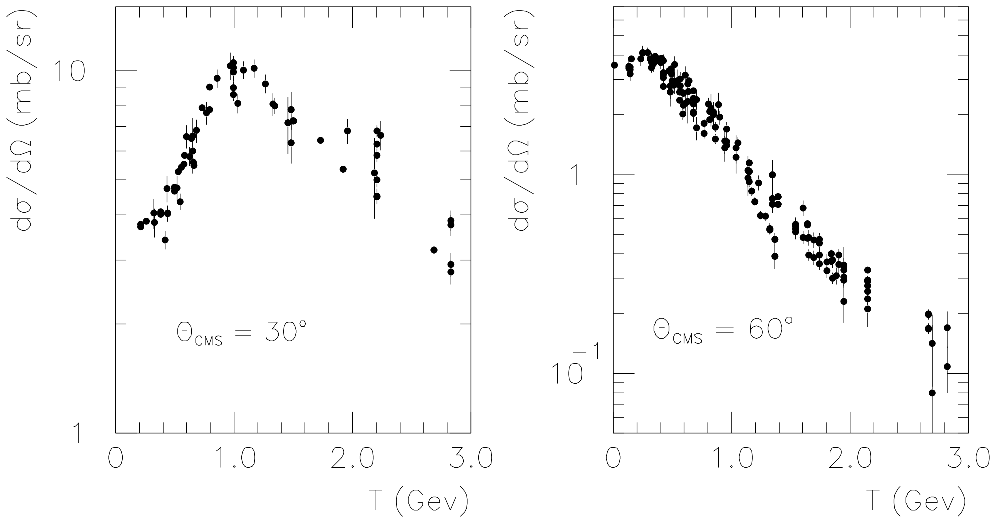


Abbildung 1.3: Weltdatensatz für den differentiellen Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega$ bei $\theta_{cm} = 30^o$ (links) und 60^o (rechts) im Energiebereich T $= 0.2 - 3.0$ GeV. (aus [WIE94])

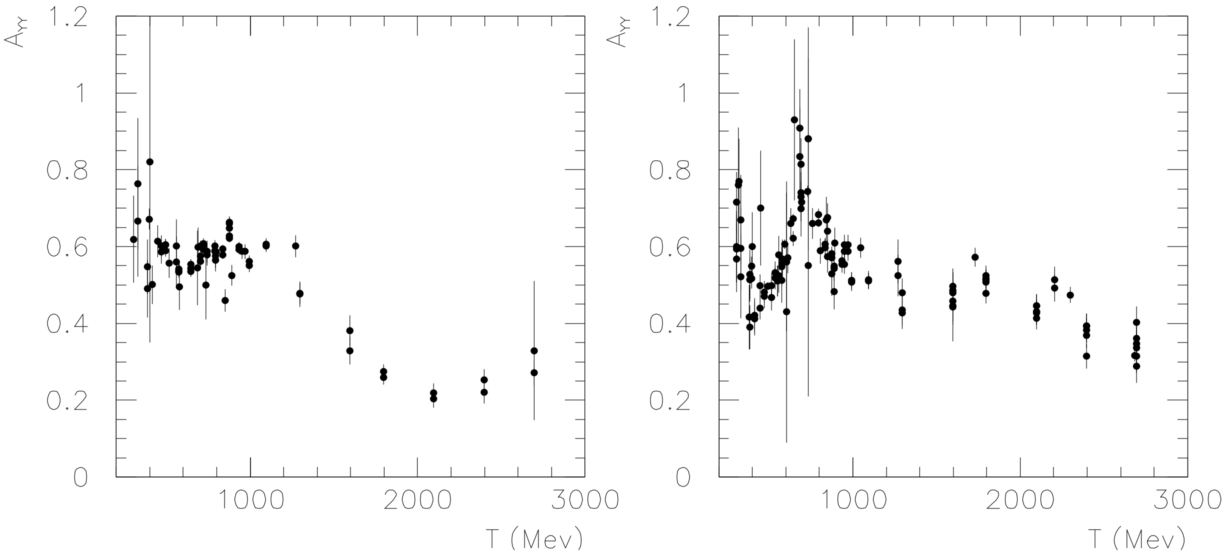


Abbildung 1.4: Weltdatensatz für A_{yy} bei $\theta_{cm} = 60^o$ (links) und 90^o (rechts) im Energiebereich $T = 0.2 - 3.0$ GeV. (aus [WIE94])

ne Energiebereiche von einigen 100 MeV.

Für Spinkorrelationsparameter, die durch Messung mit polarisiertem Strahl und polarisiertem Target gewonnen werden können, ist exemplarisch der Weltdatensatz für die Observable A_{yy} für kinetische Energien zwischen 0.2 und 3.0 GeV in Abb. 1.4 bei $\theta_{cm} = 90^o$ und 60^o dargestellt. Auch hier sind die verfügbaren Daten oberhalb von T = 1 GeV nur mit Schrittweiten bis zu einigen 100 MeV verfügbar und teilweise mit hohem Fehler behaftet.

Zusammenfassend fehlt es vor allem an Messungen über einen weiten Winkel- und Energiebereich bei gleichzeitig hoher Auflösung und guter relativer Genauigkeit, wie es für Streuphasenanalysen erforderlich ist. Auch in der Frage der dibaryonischen Zustände gibt es bisher Hinweise [AUE89, BAL93, BER85, SHI88, SHZ94], jedoch keinen schlüssigen Beweis für die Existenz solcher Resonanzen.

Die experimentelle Problematik liegt dabei im herkömmlichen Aufbau von Streuexperimenten mit aus einem Beschleuniger extrahiertem Teilchenstrahl. Eine solche Meßtechnik bedingt zur Energievariation eine zeitaufwendige Neueinstellung von Strahlführung und Extraktion des Beschleunigers. Um bei Überdeckung eines großen Raumwinkelbereichs für den Teilchennachweis genügend Statistik zu erhalten, muß außerdem bei jeder Energie verhältnismäßig lange gemessen werden. Eine Erhöhung der effektiven Targetdicke zur Verbesserung der Nutzzählrate ist dabei durch die Vielfachstreuung im Targetmaterial begrenzt. Aufgrund dieser Probleme ist die typische Energieschrittweite der Anregungsfunktionen relativ groß.

Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten bietet ein experimenteller Aufbau am Synchrotron mit internem Target und Messung während der Beschleunigung des Teilchenstrahls Vorteile. Erfolgt die Messung nicht bei jeweils fester Energie, sondern kontinuierlich während der Beschleunigung, so stellt jeder Beschleunigerzyklus eine vollständige Anregungsfunktion — mit geringer Statistik — dar. Diese Meßtechnik ist daher unempfindlich gegen systematische Fehler, wie sie durch Langzeitveränderungen (z.B. H_2- Verlust in einem CH_2-Target) hervorgerufen werden können. Um hinreichende Statistik zu erzielen, mittelt man die gemessenen Anregungsfunktionen über viele Beschleunigerzyklen ("multi-pass-technique"). So minimiert man zusätzlich den Einfluß zufälliger Instabilitäten z. B. des beschleunigten Teilchenstrahls. Dieses Meßverfahren ist daher zur Erzielung einer hohen relativen Genauigkeit besonders geeignet.

Die Energieauflösung ist hier prinzipiell nur durch die Impulsauflösung des Beschleunigers, in der Praxis jedoch durch die mimimale Größe der Zeit- bzw. Energieintervalle bestimmt, in denen genügend Statistik akkumuliert wird. Zu jedem Energieintervall muß bei der Messung während der Beschleunigung die jeweilige Strahlenergie bestimmt werden. Zur relativen Normierung der Zählraten ist es weiterhin notwendig, die Luminosität von Meßintervall zu Meßintervall relativ zu messen.

Durch den rezirkulierenden Teilchenstrahl wird ein hoher effektiver Strahlstrom erreicht, da im Target nicht wechselwirkende Strahlteilchen weiter im Ring umlaufen und so erneut am Target streuen können. Dadurch ist es möglich, ein Atomstrahltarget mit kernpolarisiertem Wasserstoffgas einzusetzen, welches wegen des reinen Targetgases untergrundfreie Messungen bei hoher Polarisation erlaubt. Aufgrund der im Vergleich zu flüssigen oder festen Targetmaterialien geringen Dichte des Gastargets ist die Messung im Rezirkulierbetrieb notwendig, um in praktikabler Zeit ausreichende Statistik zu erhalten.

Die Vorteile einer Messung mit internem Target sind in [GAR85, SHZ94] gezeigt worden. Messungen nach ähnlichen Prinzip bei höheren Energien und großer Winkelakzeptanz- und auflösung sind Ziel des EDDA-Experimentes.

1.2 EDDA

Das EDDA-Experiment ("**E**xcitation Function **D**ata Acquisition **D**esigned for **A**nalysis of Phase Shifts" oder auch "**E**lastic **D**ibaryons **D**ead or **A**live") am internen Strahlplatz TP2 des Beschleunigers COSY (**Co**oler **Sy**nchrotron) des Forschungszentrums Jülich untersucht die elastische Proton-Proton-Streuung im Bereich von 0.5 – 2.5 GeV kinetischer Strahlenergie. In einer ersten Phase des Experiments wird mit Hilfe eines einige μm dicken Polypropylen-Fadentargets ($(CH_2)_n$) der spingemittelte differentielle Wirkungsquerschnitt in Abhängigkeit von der Einschußenergie gemessen. In einer späteren Phase des Experiments können dann mit polarisiertem Strahl und bzw. oder polarisiertem Atomstrahltarget Spinobservablen wie Analysierstärke und Spinkorrelationsparameter gemessen werden. Gemessen wird während der Beschleunigungsphase von COSY in der oben erwähnten "multi-pass-technique".

Der Detektor ist schematisch in Abb. 1.5 dargestellt. Der Teilchennachweis geschieht in zwei konzentrisch zur Strahlachse angeordneten, zylindrischen Lagen von Plastikszintillatoren. Die äußere Lage besteht zum einen aus

- 32 Szintillatorstäben parallel zur Strahlrichtung zum Nachweis des Azimutwinkels φ

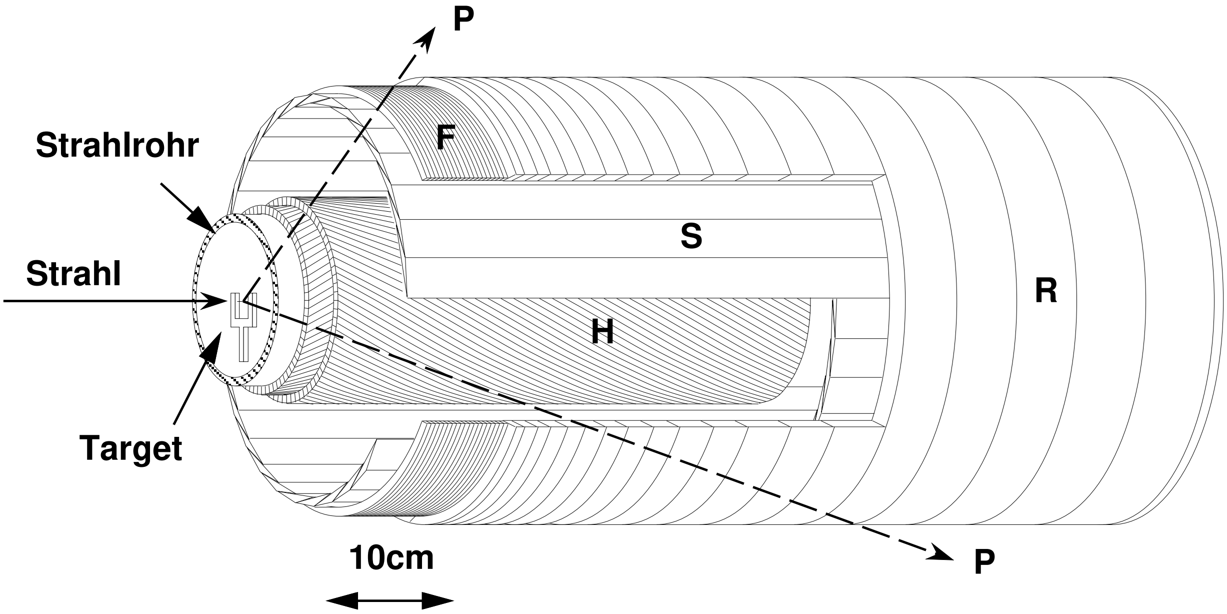


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung des EDDA-Detektors. Neben dem durch seine Halterung angedeuteten Fadentarget erkennt man die innere Detektorlage aus gegensinnig helixartig gewickelten szintillierenden Fasern (H) sowie die äußere Detektorlage aus Szintillatorstäben (S) und Ringen (R). Die Ringe zu extremen Rückwärtwinkeln sind ebenfalls aus szintillierenden Fasern gefertigt (F). Die Trajektorien zweier elastisch gestreuter Protonen (P) sind gestrichelt angedeutet.

der Ejektile sowie

- zwei Halbschalen von je 29 halbring-förmigen Szintillatorelementen zur Bestimmung des Polarwinkels θ der auslaufenden Teilchen.

Der damit abgedeckte Winkelbereich beträgt dabei $\theta_{lab} = 10^o - 72^o$ ($\theta_{cm} = 25^o - 150^o$) sowie $\varphi_{lab} = \varphi_{cm} = 0^o - 360^o$. Die durch die Abmessungen der Szintillatorelemente gegebene Winkelauflösung beträgt dabei $\Delta\varphi = 11.25^o$ bzw. $\Delta\theta_{cm} \approx 5^o$.

Zur Erhöhung der Winkelauflösung über die Granularität der Szintillatorelemente hinaus dient zusätzlich die Verwendung überlappender Szintillatorquerschnitte. Dieses Prinzip ist schematisch in Abb. 1.6 dargestellt. Beim Durchgang durch benachbarte Szintillatoren verliert das Teilchen gemäß dem Verhältnis seiner Wegstrecken in den Szintillatoren unterschiedlich viel Energie. Dies resultiert in unterschiedlicher Lichtausbeute und damit Pulshöhe in den benachbarten Elementen, so daß das Verhältnis der Signalamplituden ein direktes Maß für den Durchstoßpunkt des Teilchens ist. Dieses Verfahren verbessert die Winkelauflösung zu $\Delta\theta_{lab} \approx 1.5^o$ bzw. $\Delta\varphi \approx 1.5^o$ Halbwertsbreite [BIS93].

Während in der ersten Phase des Experimentes aufgrund des geringen Überlapps zwischen Teilchenstrahl (Ausdehnung wenige mm) und Fadentarget die Wechselwirkungszone als punktförmig angenommen werden kann, muß in der zweiten Phase des Experimentes

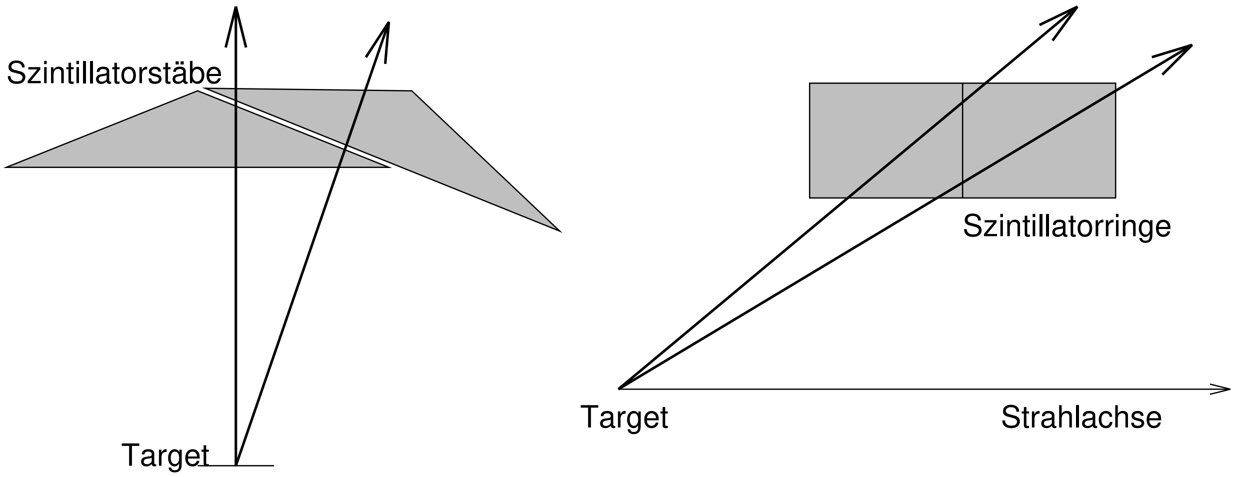


Abbildung 1.6: Prinzip der Erhöhung der Winkelauflösung durch überlappende Szintillatorquerschnitte für die Stäbe (links) bzw. Ringe (rechts). Beim Durchgang durch die Szintillatoren verlieren die Teilchen Energie gemäss ihrer zurückgelegten Wegstrecke. Das Verhältnis der Pulshöhen in benachbarten Szintillatoren ermöglicht einen Rückschluß auf den Durchstoßpunkt.

wegen der räumlichen Ausdehnung des Atomstrahls (einige cm) zusätzlich der Primärvertex jedes Ereignisses bestimmt werden. Der Atomstrahl besteht dabei aus einem Kernbereich hoher Polarisation sowie einer Randzone ("Halo") unpolarisierter Protonen. Eine Bestimmung des Vertex stellt sicher, daß tatsächlich eine Wechselwirkung mit polarisierten Atomstrahl-Protonen stattgefunden hat.

Zu diesem Zweck ist eine zweite, innere Lage von Szintillatoren vorgesehen. Die in Form einer gegenläufigen Doppelhelix gewickelten, 2.5 mm dicken szintillierenden Fasern ermöglichen die Bestimmung eines zweiten Punktes entlang der Ejektiltrajektorie und damit zusammen mit der Ortsinformation der äußeren Detektorlage eine Rekonstruktion des Primärvertex [LAH92].

Als relatives Maß für die tatsächliche Luminosität dienen in der ersten Phase des Experimentes zwei unabhängige Meßverfahren. Beide nutzen primär die elastische Streuung von Strahlprotonen mit Hüllenelektronen der Targetatome. Dazu werden sowohl die entstehenden höherenergetischen δ-Elektronen mit Halbleiterzählern ("PIN-Dioden") nachgewiesen, als auch die durch weitere Ionisationen im Targetmaterial entstehenden Sekundärelektronen als integraler Strom gemessen ("SEM" = **S**ekundär**e**lektronen-**M**onitor).

Die Identifizierung elastischer Proton-Proton-Ereignisse geschieht mittels kinematischer Koinzidenz. Dabei wird ausgenutzt, daß die elastisch gestreuten Protonen koplanar mit der Strahlachse sind und ihre Polarwinkel kinematisch korreliert sind. Beide Eigenschaften werden sowohl für den Experimenttrigger [SCH91] als auch für die Datenanalyse genutzt.

Zur Kontrolle von Funktion und Linearität der Photovervielfacher von Stab- und Halbringszintillatoren ist ein Laser-Monitorsystem vorgesehen. Mittels Einkopplung definierter Lichtmengen in die Photovervielfacher können Schwankungen im Verstärkungsverhalten erfaßt und ggf. korrigiert werden.

Nach vorbereitenden Messungen und Tests bis Ende 1993 konnte in 1994 die äußere Detektorlage aus Szintillatorstäben und Halbringen sowie Sekundärelektronen-Monitor und PIN-Dioden komplett installiert, in Betrieb genommen und zur Datennahme verwendet werden. Das Lasersystem wurde ebenfalls 1994 installiert und zu ersten Testmessungen benutzt. Die innere Lage aus szintillierenden Fasern befindet sich noch im Aufbau.

1.3 Thema

Thema dieser Arbeit war Entwurf, Aufbau und Inbetriebnahme des Datenaufnahmesystems für den EDDA-Detektor. Ziel war es, durch ein flexibles Konzept nicht nur den speziellen Anforderungen des EDDA-Experimentes zu genügen, sondern das Datenaufnahmesystem auch für weitere Experimente an COSY nutzbar zu gestalten. Dies gelang sowohl für die bisher durchgeführten vorbereitenden Messungen für COSY-Experimente, wie auch für den beginnenden Meßbetrieb der Experimente MOMO [JAH89] und EDDA.

Im folgenden wird im wesentlichen auf die Datennahme im EDDA-Experiment eingegangen. Anhand von Daten im Energiebereich bis 1 GeV, die in der Meßperiode vom 13.–18.6.1994 gewonnen wurden, soll die Funktionsfähigkeit von Datenaufnahmesystem und Detektorkomponenten gezeigt werden.

Kapitel 2 schildert die verschiedenen **Detektorkomponenten**, die von ihnen gelieferten Daten sowie deren **Auslese** und **Speicherung**. **Trigger** und **Totzeitmessung** werden ebenso diskutiert wie die Erfassung der momentanen **Strahlenergie** und **Luminosität**.

Kapitel 3 beschreibt die Implementierung des **Datenanalyseprogramms** zur Auswertung und Kontrolle der Daten sowohl während der Messung ("Online") als auch zur späteren Endauswertung der auf Magnetband vorliegenden Meßdaten ("Offline").

Kapitel 4 stellt erste Ergebnisse des EDDA-Detektors mit Schwerpunkt auf Datenaufnahme und Trigger vor. Anhand von **Messungen bei fester Energie** werden **Detektoreigenschaften**, **Ereignisrekonstruktion** und **Trigger** sowie **Luminosität** untersucht. Abschließend wird anhand der Identifizierung elastischer Ereignisse bei **Messungen während der Beschleunigung** demonstriert, daß die kontinuierliche Messung von Anregungsfunktionen möglich ist.

Kapitel 5 bietet schließlich eine kurze **Zusammenfassung** der Ergebnisse.

2 Datenaufnahme

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Komponenten des Datenaufnahmesystems, soweit sie für das Verständnis der Messungen relevant sind.

2.1 Anforderungen und Konzeption

Der Entwurf des Datenaufnahmesystems für COSY-Experimente basiert auf Empfehlungen der CANU-Kommission "Datenaufnahme COSY" [CAN91]. Zusätzlich war es für die Experimente mit maßgeblicher Beteiligung des Instituts für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn wichtig, ein einheitliches System zu entwickeln, welches für die unterschiedlichen Experimentanforderungen gleichermaßen geeignet ist. Ausgehend davon waren die Hauptentwurfskriterien:

- Das System soll die Integration aller gängigen Standards der Digitalisierungselektronik unterstützen. Dies bedeutet Schnittstellen zu CAMAC, FASTBUS und VME. Dabei sollen kommerziell erhältliche Standardkomponenten zum Einsatz kommen.

- Bedingt durch die benötigte Flexibilität soll die Architektur des Datenaufnahme-Systems in hohem Maße modular sein und die Funktionen **Digitalisierung**, **Formatierung** und Zusammenfassen der (Teil-)Ereignisse ("event-building"). **Datenspeicherung**, **Experimentsteuerung** und -überwachung sowie **Analyse** und Visualisierung der Daten klar trennen.

- Das Zusammenfassen und Formatieren der Daten ("event-building") sowie das Speichern der Daten auf Magnetband soll mit einem VME-Rechner erfolgen. Dieser Rechner wird im folgenden mit *"Eventbuilder"* bezeichnet.

- Zur Experimentüberwachung und Analyse der Daten während der Messung sollen grafikfähige Arbeitsplatzrechner ("Workstations"), typischerweise mit einer Variante des UNIX-Betriebsystem verwendet werden. Dieser Rechner wird im folgenden mit *Analyserechner* bezeichnet.

- Als Schnittstellen zwischen Rechnersystemen sollen VME (und Subsysteme, wie z.B. VSB - VME Side Bus), SCSI und Ethernet (TCP/IP) verwendet werden.

- Um die Anforderungen unterschiedlicher Experimente zu erfüllen, sollen Datenerfassungs und -analysesoftware weitestgehend flexibel sein. Falls möglich, sollen identische Programme benutzt werden, um Stabilität und Wartbarkeit sicherzustellen.

Für das Datenerfassungssystem führte dies zur Adaptierung eines an der GSI Darmstadt entwickelten Systems, welches kommerziell erhältliche Module zur Kommunikation zwischen CAMAC, FASTBUS und VME einsetzt und bereits für Experimente an der GSI verwendet wurde. Die zugehörige Software (TDAS) wurde ebenfalls übernommen, jedoch für die speziellen Bedürfnisse der geplanten Experimente an COSY modifiziert und erweitert. Für die Datenanalyse wurde ein neues Programmpaket ("YODA") entwickelt, welches in Kapitel 3 dargestellt ist.

Von besonderer Wichtigkeit war es, die Komponenten so flexibel zu halten, daß ein problemloser Einsatz unter unterschiedlichen Experimentbedingungen möglich ist. Insbesondere bietet die entwickelte Software die Möglichkeit, durch einfache Anpassung durch den Benutzer verschiedenste Hardware-Konfigurationen zu integrieren. Die Daten werden einheitlich verarbeitet, gespeichert und "online" überwacht. Das System ist für die Experimente MOMO [JAH89] und EDDA im Einsatz und hat sich sowohl für vorbereitende Messungen als auch den eigentlichen Meßbetrieb bewährt.

Im folgenden wird das Datenaufnahmesystem für das EDDA-Experiment beschrieben. Dabei sind die Komponenten der Digitalisierungselektronik Chararakteristika des Experimentes. Die Hard- und Softwarekomponenten der Datenaufnahme sind hingegen experimentunabhängig. In den weiteren Abschnitten wird die Gesamtheit von stab- und halbringförmigen Szintillatorelementen als *Außenschale*, die Doppelhelix szintillierender Fasern als *Innenschale* des Detektors bezeichnet.

Abb. 2.1 zeigt den schematischen Aufbau des EDDA-Datenaufnahmesystems. Die Digitalisierungselektronik ist überwiegend mit kommerziellen Elektronikmodulen im sog. *CAMAC*-Standard realisiert. Dabei bietet CAMAC sowohl normierte Packungseinheiten und Spannungsversorgungen als auch die Möglichkeit, die Daten der Digitalisierungselektronik mit Hilfe von *CAMAC-Controllern* (spezielle CAMAC-Module) an andere Bussysteme und damit Rechner zu transferieren. Im EDDA-Experiment werden z.Zt. drei Standard-CAMAC-Überrahmen verwendet. Die Digitalisierungselektronik der Innenschale "PCOS" (s. Abschnitt 2.5) ist in einem zusätzlichen, modifizierten CAMAC-Überrahmen untergebracht, welcher in Abb. 2.1 nicht dagestellt ist. Dieser wird über ein spezielles CAMAC-Modul ("PCOS-Adapter") mit den standardisierten CAMAC-Überrahmen verbunden.

Im einzelnen befinden sich in den Überrahmen die Digitalisierungselektronik der Außenschale ("FERA ADC/TDC", Diskriminatoren, Delays, s. Abschnitt 2.2), die Module der Triggerlogik (s. Abschnitt 2.3), sowie die Module weiterer Detektorkomponenten (s. Abschnitt 2.5). Dabei handelt es sich um die Erfassung der Signale der Halbleiterzähler zur Messung der δ-Elektronen ("PIN-Dioden"), des Sekundärelektronensignals ("SEM"), sowie des Lasermonitorsystems.

Alle CAMAC-Module werden vom "Eventbuilder" über "VSB" (s. Abschnitt 2.4) ausgelesen. Dort werden die Daten formatiert und und auf Magnetband gespeichert. Über "Ethernet" (ein serielles Datenübertragungsverfahren unter Verwendung von Koaxialkabeln) und Einsatz des sog. "TCP/IP"-Protokolls [COM91] können die Daten auf Anforderung zusätzlich an einen oder mehrere Analyserechner übertragen werden. Dort läßt sich mit Hilfe der Analysesoftware (z. B. "YODA", s. Kap. 3) eine Kontrolle der Daten während der Messung vornehmen. Der VME-Überrahmen enthält zusätzlich ein Modul, welches die

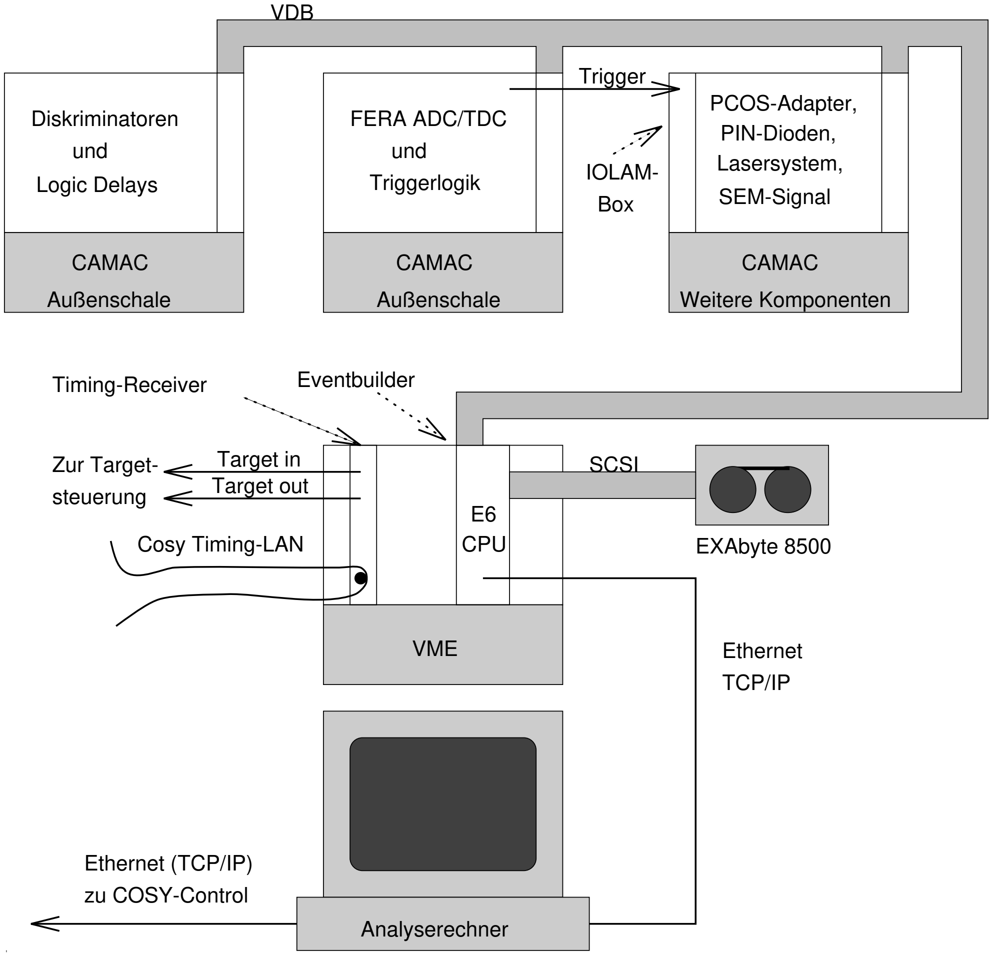


Abbildung 2.1: Übersicht über das EDDA-Datenaufnahmesystem. Die Komponenten der Digitalisierungslektronik sind im CAMAC-Standard realisiert. Die Datenauslese geschieht über VDB mittels einer VME-CPU ("Eventbuilder"). Dort werden die Daten formatiert und auf Magnetband (EXAbyte 8500) gespeichert. Die Daten können während der Messung an einen oder mehrere Analyserechner übertragen werden. Zusätzlich enthält der VME-Überrahmen ein Modul zum COSY-synchronen Targetsteuerung ("Timing Receiver").

Anbindung an das Zeitsynchronisationssystem der COSY-Leittechnik gestattet ("timing-receiver"). Dieses Modul dient zur phasenrichtigen Targetsteuerung in Koordination mit dem Beschleunigungszyklus (s. Abschnitt 2.6). Zur Übertragung von Maschinenparametern des Beschleunigers ist der Analyserechner mit der COSY-Leittechnik über Ethernet (TCP/IP) verbunden. Einzelheiten zu Hard- und Software des Systems sind im folgenden dargestellt.

2.2 Die Detektor-Außenschale

Aus dem Durchgang ionisierender Teilchen durch die Szintillatorelemente der äußeren Schale (32 Szintillatorstäbe sowie 58 Szintillatorhalbringe) lassen sich mehrere Informationen gewinnen. Im folgenden bezeichnet ein "Treffer" ein Signal oberhalb einer Schwelle in einem Detektorelement.

1. Die Nummer der getroffenen Szintillatoren bietet eine grobe Orts- und damit Winkelbestimmung. Die Pulshöhen der den Szintillatoren angeschlossenen Photomultipliern müssen dazu diskriminiert werden, um sie in logische Pulse ("Treffer ja/nein") umzuwandeln. Diese Signale bilden sowohl die Grundlage für den Trigger als auch für die Zeitmessung (s.u.).

2. Der Energieverlust der Teilchen beim Durchgang durch die Szintillatoren ist ein Maß für die zurückgelegte Wegstrecke im Szintillator. Damit läßt sich aufgrund der speziell gestalteten Szintillatorquerschnitte der Durchstoßpunkt des Teilchens genauer als durch die Granularität der Szintillatoren allein bestimmen. Die Pulshöhen der Photomultiplier-Signale müssen dazu digitalisiert werden. Für die Verbesserung der Ortsauflösung genügt hier eine Digitalisierungsgenauigkeit von 10 Bit, das entspricht einer Abbildung der analogen Pulshöhe auf einen Wertebereich von 0 bis 1023.

3. Für die Halbringe, die aufgrund ihrer geringen Abmessungen aus szintillierenden Fasern zusammengesetzt sind, liefert das Verfahren der Erhöhung der Ortsauflösung durch Betrachtung des Signalhöhenverhältnisses benachbarter Ringe aus geometrischen Gründen keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Bei großen Polarwinkeln wird sogar nur je ein Halbring getroffen. Die Ortauflösung läßt sich für diese Szintillatoren jedoch durch Registierung der einzelnen getroffenen Fasern mittels sog. "latching discriminators" (Vielkanal-Diskriminatoren, die innerhalb eines Zeitfensters auftretende Signale als "Treffermuster" — also pro Kanal als Ja/Nein-Information — zur Vefügung stellen) verbessern. Die Ortauflösung liegt damit in der Größe der Abmessungen der einzelnen Fasern (2.5 mm).

4. Für den Durchgang ionisierender Teilchen, die zum gleichen Primärereignis gehören und damit "gleichzeitig" das Target verlassen, gilt in der Außenschale eine starke Zeitkorrelation. Die Zeitdifferenz zwischen Szintillatorsignalen unterschiedlicher Ejektile desselben Ereignisses setzt sich aus der Flugzeit der Ejektile vom Wechselwirkungspunkt bis zu den Szintillatoren, der Laufzeit des in den Szintillatoren erzeugten Lichts sowie der Signallaufzeiten in Kabeln und der Elektronik zusammen. Die Szintillatorstäbe werden sowohl targetnah als auch targetfern getrennt mit Photomultipliern ausgelesen. Die Zeitdifferenz dieser Signale eines Szintillators ist zusätzlich ein Maß für den Durchstoßpunkt entlang des Stabes.

   Mißt man die relativen Zeiten der registrierten Pulse, so läßt sich damit sicherstellen, daß die registrierten Treffer zum gleichen Primärereignis gehören. Da für elastische Proton-Proton-Ereignisse bestimmte Kombinationen von je Stab- bzw. Ringtreffern ausgeschlossen sind, kann man hier durch geeignete logische ODER-Verknüpfungen diese Kombinationen zu je einem TDC-Kanal zusammenfasssen ("Routing"). Welcher der "geoderten" Kanäle zur Messung beigetragen hat, ist anhand der Treffer in den ADCs feststellbar. Man sollte so eine aussagekräftige Zeitmessung bei deutlich reduziertem Kanalaufwand erreichen [FRI93]. Während der vergangenen Meßperioden wurden verschiedene Konzepte des Zeit-"Routings" erprobt. Für die Fragestellungen in Kapitel 4 sind die Daten der Zeitmessung nicht relevant und werden im folgenden nicht verwendet.

Das Blockschaltbild der für die Messung verwendeten Elektronik ist in Abb. 2.2 vereinfacht dargestellt. Aufgrund der relativ hohen Kanalzahl kommen zum großen Teil kommerzielle Module mit hoher Packungsdichte zum Einsatz. Die von den Photomultipliern kommenden analogen Signale werden zunächst verdoppelt ("Fan-Out") und zum einen auf die Diskriminatoren, zum anderen über Verzögerungsleitungen auf die Eingänge der ADCs gegeben. Die logischen ECL-Pulse (Emitter-Coupled Logic) vom Ausgang der Diskriminatoren gelangen dann sowohl zur Zeitmessung wie auch zur Triggerschaltung. Der Trigger der Außenschale liefert nach einer Zeit von etwa 80 ns (ab Eingang der Diskriminatoren) eine Entscheidung, ob das Ereignis digitalisiert werden soll. Dieser Triggerpuls erzeugt sowohl das Digitalisierungsfenster fur die ADCs ("Gate"), die erste Zeitmarkierung für den TDC ("Common Start"), sowie einen Auslöser für die Datenauslese mit dem "Eventbuilder". Die jeweils zweite Zeitmarkierung für die einzelnen TDC-Kanäle bilden die durch ein in Abb. 2.2 nicht dargestelltes logisches ODER verknüpften Stab- bzw. Ringsignale, die über Verzögerungsleitungen ("delay line") auf die "individual stop" Eingänge der TDCs gelangen. In Abb. 2.2 wird der Zweig für die Zeitmessung so behandelt, als ob für jeden Stab- bzw. Ring auch ein TDC-Kanal zur Verfügung steht. Das tatsächlich verwendete Zusammenfassen von TDC-Kanälen ("Routing") wie oben diskutiert wird vernachlässigt. Ferner werden die Szintillatorstäbe an beiden Enden ausgelesen und die Pulshöhen getrennt digitalisiert. Für den koplanaren Trigger wird jedoch durch ein logisches ODER der diskriminierten Signale beider Enden nur je ein Signal pro Stab zur Triggerentscheidung herangezogen.

Die Halbringe 1–9 sind jeweils durch 4 Bündel szintillierender Fasern realisiert. Für diese einzelnen Fasern zeigt Abb. 2.3 als Ergänzung zu Abb. 2.2 das Blockschaltbild der Elektronik. Die Signale der 36 einzelnen Fasern werden verdoppelt ("Fan-Out"), und gelangen auf die "latching discriminators", die das Treffermuster der Fasern bis zum Eintreffen eines Stop-Pulses ("Sync") akkumulieren. Dieser Stop-Puls wird vom Trigger der Außenschale nach einer Zeit von ca. 140 ns geliefert. Die Treffermuster in den "latching discriminators" sind über CAMAC vom "Eventbuilder" lesbar. Die Diskriminatorausgänge der "latching discriminators" werden nicht verwendet. In der nachfolgenden Elektronik werden je vier Signale benachbarter Einzelfasern zu einem Halbring zusammengefasst ("4 x Fan-In"). Diese Signale entsprechen Halbringen mit vergleichbarer θ_{cm}-Granularität wie die Halbringe 10–29. Auf Basis dieser Signale geschieht dann die Weiterverarbeitung wie in Abb. 2.2 dargestellt.

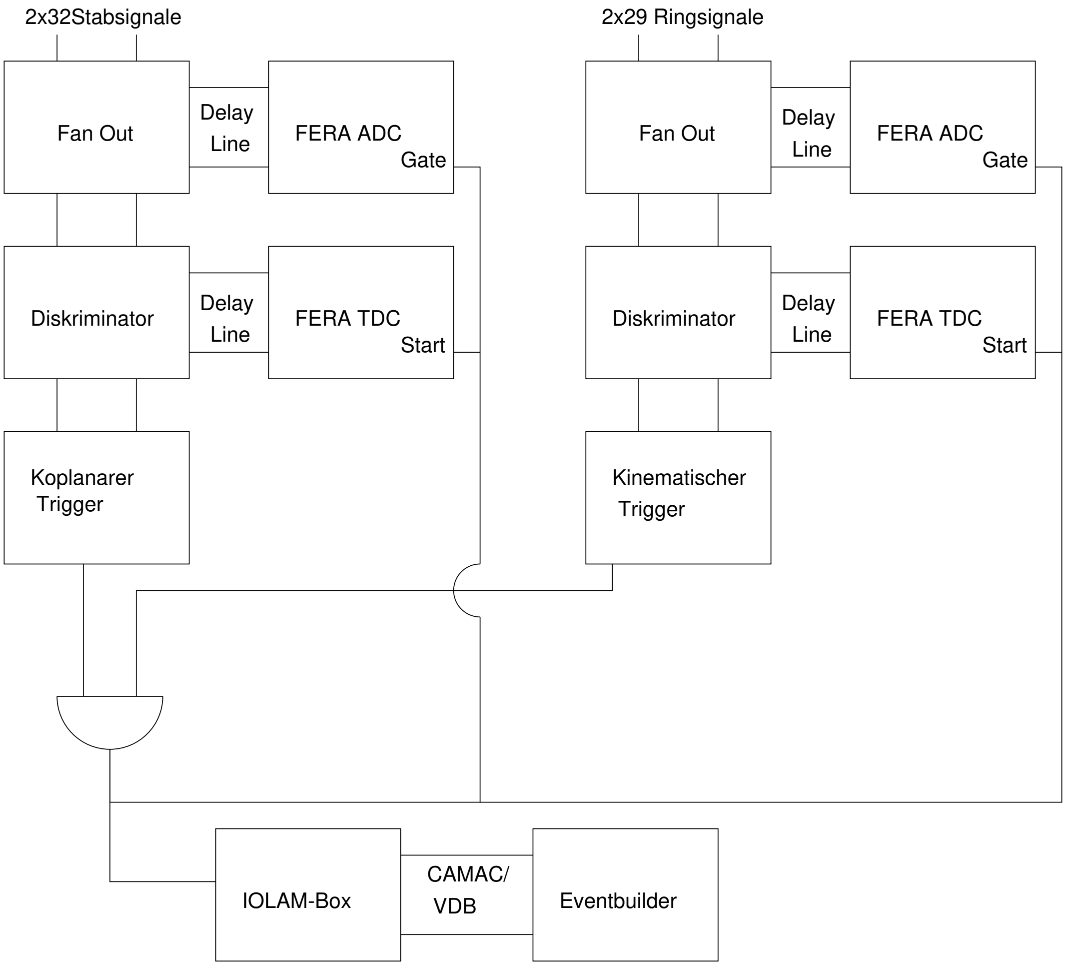


Abbildung 2.2: Blockschaltbild der Digitalisierungselektronik der Detektor-Außenschale. Die Analogsignale der Photovervielfacher gelangen über Signalvervielfacher ("Fan Out") sowohl über Verzögerungskabel zu den ladungsintegrierenden Digitalisiereinheiten ("FERA ADC") wie zu den Diskriminatoren. Die diskriminierten Signale bilden die Eingänge der Triggerschaltungen und der Zeitmessung. Das logische UND beider Trigger stellt "Gate" der ADCs, Start der TDCs sowie Auslöser der Datennahme.

Nach Auslösen der Datenaufnahme werden die Inhalte der ADC und TDC-Module sowie die Treffermuster in den "latching discriminators" über CAMAC und VDB ausgelesen. Die FERA-ADCs bieten dabei die Möglichkeit, nur die Kanäle, die oberhalb einer individuell einstellbaren Schwelle ("Pedestal") liegen, in komprimierter Form an den "Eventbuilder" zu übermitteln. Dies erhöht die Effizienz der Datennahme, da für ein typisches Proton-Proton-Ereignis nur 10% der Kanäle gültige Signale liefern.

Zur Kontrolle der Außenschalen-Szintillatoren und -Photovervielfacher ist für den standardisierten Meßbetrieb ein Laser-Kalibrationssystem vorgesehen. Dieses wurde in der zweiten Jahreshälfte 1994 in den Detektoraufbau integriert. Es bildet eine zusätzliche, un-

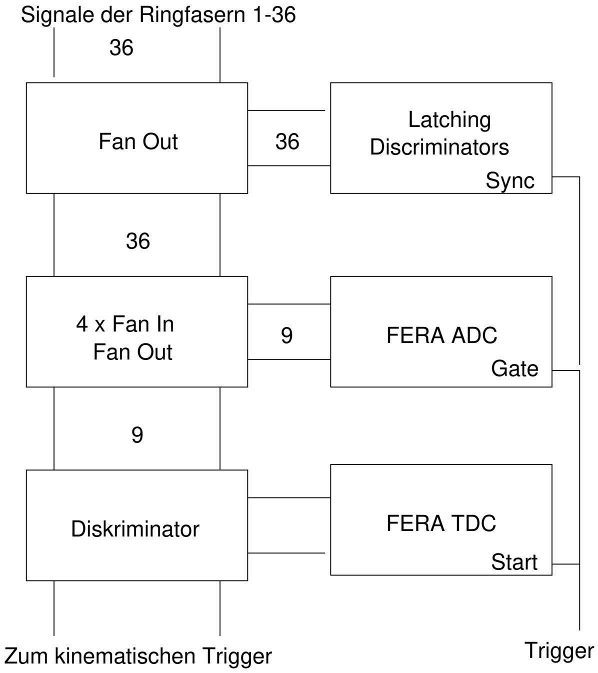


Abbildung 2.3: Blockschaltbild der Elektronik für die Signale der szintillierenden Ringfasern. Je vier Fasern werden für Trigger, ADC bzw. TDC zu einem Halbring zusammengefaßt. Das Treffermuster der Einzelfaser-Signale wird in "latching discriminators" festgehalten. Die Weiterverarbeitung geschieht wie in Abb. 2.2 dargestellt.

abhängige Triggerquelle für das Datenaufnahmesystem und wurde in der Meßperiode vom 22.–27.8.1994 zu ersten Testmessungen benutzt. Es wird im folgenden nicht betrachtet.

2.3 Der Trigger

Der Trigger bildet den Auslöser für die Datennahme. Im EDDA-Experiment kann die Datenaufnahme durch verschiedene Detektorkomponenten ausgelöst werden. Jede Komponente bewirkt dabei unabhängig die Auslese der korrespondierenden Elektronik. Einzelheiten zur Realisierung der konkurrierenden Triggerquellen sind in Abschnitt 2.4 dargestellt.

Eine Koinzidenzschaltung von Szintillatorelementen der Außenschale löst die Auslese der ADCs, TDCs und "latching discriminators" (Abschnitt 2.2) aus. Diese Schaltung ist im folgenden beschrieben. PIN-Dioden, SEM-Signal und Lasersystem sind jeweils weitere, unabhängige Triggerquellen. Sie werden in späteren Abschnitten diskutiert. Der Trigger der Außenschale bewirkt nach Einbau der inneren Detektorlage auch die Auslese der Doppelhelix szintillierender Fasern über das PCOS-System. Die innere Detektorlage benötigt daher keine eigene Triggerlogik.

Der Entwurf und Test der elektronischen Triggerschaltung der Außenschale ist in [SCH91] beschrieben. Ergänzende Informationen lieferten Monte-Carlo-Simulationen, z.B. [GRO93]. Da die Realisierung in einigen Punkten vom ursprünglichen Entwurf abweicht, ist sie im folgenden kurz skizziert. Die Triggerschaltung der Außenschale gliedert sich in zwei Teilschaltungen, die unabhängig voneinander eingesetzt werden können: Der **koplanare** Trigger testet die Koplanarität der registrierten Ejektile mit der Strahlachse, der **kinematische** Trigger prüft, ob die Polarwinkel der Ejektile gemäß der Kinematik elastischer Proton-Proton-Streuung korreliert sind. Ein Ereignis wird als möglicherweise elastisch akzeptiert, wenn es beide Bedingungen zu einem gewissen Grad erfüllt. Eine genaue Prüfung erfolgt später in der Datenanalyse.

Der **koplanare Trigger** nutzt die Koplanarität der elastisch gestreuten Protonen mit dem Strahl. Projektil und Rückstoßproton schließen dann einen azimutalen Winkel von $\Delta\varphi = 180^o$ ein. Für eine ideale Detektorgeometrie registrieren dabei nur exakt gegenüberliegende Szintillatorstäbe Treffer. Eine feste Koinzidenzschaltung je zweier gegenüberliegender Stäbe ist dann ausreichend (im folgenden "1-1"-Trigger genannt) und ist in Abb. 2.4 skizziert. Die von den Photomultipliern verstärkten Signale der Szintillatoren gelangen über 16-Kanal Diskriminatoren und Verzögerungsmodule auf eine als 16-Kanal-Koinzidenz ($\wedge$, "AND") geschaltete Logik-Einheit. Dort geschieht die Verknüpfung gegenüberliegender Stabsignale ($S1 \wedge S17, S2 \wedge S18, etc.$). Ist mindestens eine dieser Koinzidenzen erfüllt, liefert die anschliessende, als 16-fach ODER geschaltete Einheit ($\vee$,"OR") das koplanare Triggersignal. Aufgrund des relativ großen, von den Stäben abgedeckten Raumwinkels werden echt koplanare Ereignisse auch erkannt, wenn sie bis zu 3 cm exzentrisch von der Stahlachse ausgehen und damit falsche Azimutwinkel vortäuschen [GRO93].

Um den Effekt von der Strahlachse exzentrischer Ereignisse untersuchen zu können, wurde zusätzlich eine Schaltung entwickelt, die Ereignisse bis zu Exzentrizitäten von ca. 6 cm von der Strahlachse sicher erkennt. Dabei werden dem direkt gegenüberliegenden Stab benachbarte Szintillatorlemente zur Koinzidenzbildung herangezogen werden. Diese erweiterte Schaltung (im folgenden "1-3"-Trigger genannt) ist in Abb. 2.5 dargestellt. Hier

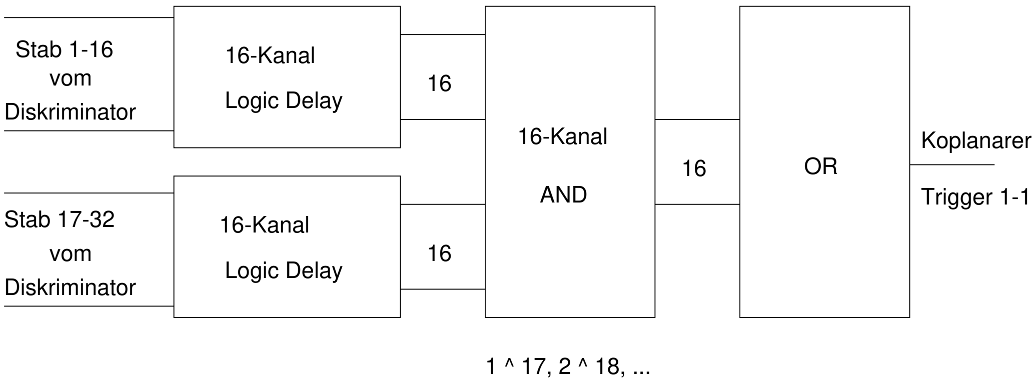


Abbildung 2.4: Blockschaltbild des koplanaren "1-1"-Triggers. Die von den Diskriminatoren der Stabszintillatoren kommenden Signale gelangen über Verzögerungsmodule auf eine logische UND-Schaltung mit 16 Kanälen ("AND"). Dieses bildet die Koinzidenzen gegenüberliegender Stäbe (1$\wedge$17), (2$\wedge$18), etc. Ein abschließendes logisches ODER ("OR") mit 16 Eingängen liefert das Triggersignal, falls mindestens eine der Koinzidenzen erfüllt ist.

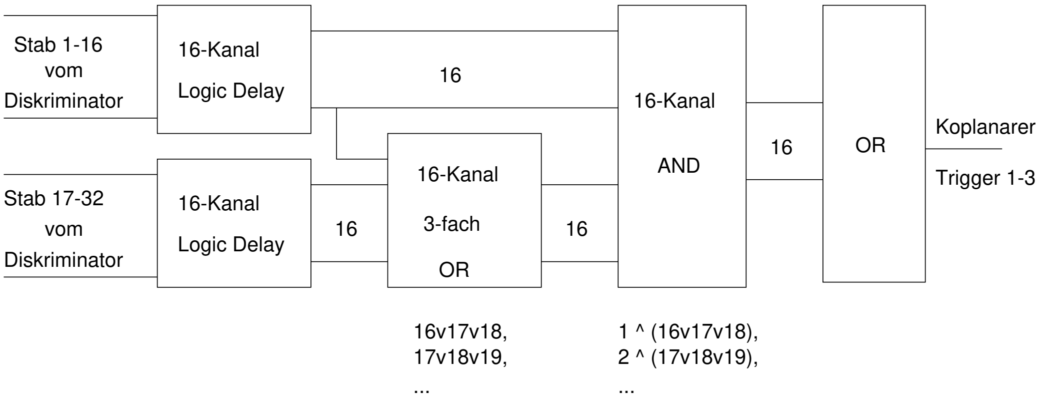


Abbildung 2.5: Blockschaltbild des koplanaren "1-3"-Triggers. Aus den diskriminierten und verzögerten Signale der Stäbe 16 sowie 17–32 werden durch logisches ODER ("OR") die Verknüpfungen (16∨17∨18), (17∨18∨19), etc. benachbarter Stäbe hergestellt. Die nachfolgende logische UND ("AND") bildet die Koinzidenz mit dem jeweils gegenüberliegenden Stab 1,2, etc. Das abschliessende logische ODER ("OR") liefert den Trigger, falls mindestens eine Koinzidenz stattgefunden hat.

wird im Gegensatz zum "1-1"-Trigger zunächst durch eine logische ODER-Schaltung mit drei Eingängen) die Verschaltung benachbarter Szintillatorstäbe bewirkt ($S16 \vee S17 \vee S18, S17 \vee S18 \vee S19, \ldots$), bevor in der anschließenden Koinzidenz die Verknüpfung mit dem jeweils gegenüberliegenden Stab erfolgt ($S1 \wedge (S16 \vee S17 \vee S18), S2 \wedge (S17 \vee S18 \vee S19), \ldots$). Das nachfolgende ODER liefert wieder das Triggersignal, falls mindestens eine der Koinzidenzen erfüllt ist.

Da die verwendeten Logik-Module über CAMAC programmierbar sind, lassen sich rechnergesteuert Triggervarianten einstellen. So ist es bei fester Verkabelung z.B. möglich, einen "offenen" Trigger mit der Bedingung "mindestens ein Stabtreffer" durch Umschalten der zweiten Koinzidenz-Logikeinheit ("16-Kanal AND") in Abb. 2.5 auf logisches ODER herzustellen.

Sowohl der "1-1"-Trigger als auch der "1-3"-Trigger wurden in der Meßperiode vom 13-18.6.1994 aufgebaut und getestet. Ein Vergleich findet sich in Kapitel 4.

Der **kinematische Trigger** prüft, ob ein Ereignis die für die Polarwinkel θ_1 und θ_2 zweier elastisch gestreuter Protonen geltende Beziehung

$$\tan\theta_1 \tan\theta_2 = 1/\gamma^2 = 1/(1 + \frac{T}{2m_p}) \tag{2.1}$$

erfüllt. Dabei ist γ der Lorentzfaktor zwischen Laborsystem und Schwerpunktsystem, T die kinetische Energie des Strahls und m_p die Ruhemasse des Protons. Dies führt zu mit der Strahlenergie variierenden Koinzidenzen von Halbringsignalen. Für die kinematische Betrachtung der elastischen Proton-Proton-Streuung ist es sinnvoll, den Detektor in einen Rückwärts- und einen Vorwärtswinkel-Bereich einzuteilen. Der Rückwärtswinkel-Bereich entspricht dabei einem polaren Streuwinkel $\theta_{cm} > 90^o$, der Vorwärtswinkel-Bereich einem

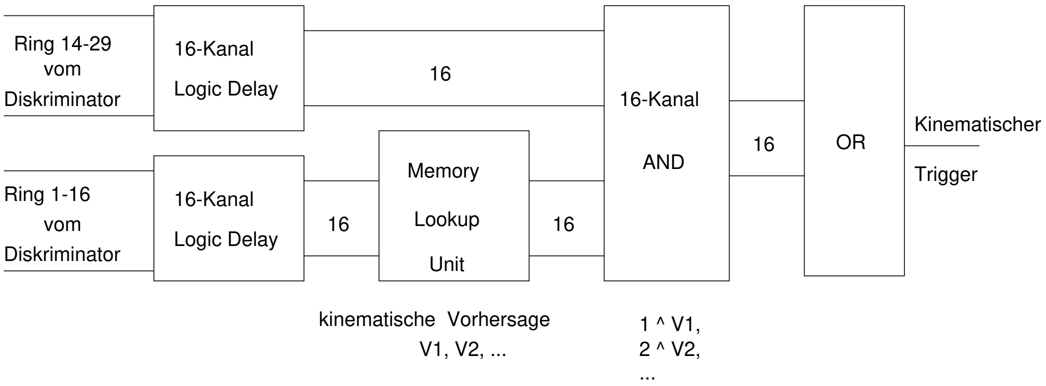


Abbildung 2.6: Blockschaltbild des kinematischen Triggers. Die von den Diskriminatoren der halbringförmigen Szintillatoren 1–16 kommenden Signale gelangen über 16-Kanal-Verzögerungsmodule ("Logic Delay") auf die sog. Memory Lookup Unit. Dort wird das Vorhersage für die getroffenen Halbringe 14–29 generiert. Vorhersage und tatsächliche Treffer werden in einer 16-fach Koinzidenz ("AND") verknüpft. Bei mindestens einer Übereinstimmung liefert das abschliessende "OR" das kinematische Triggersignal.

Streuwinkel von $\theta_{cm} < 90^o$. Falls $\theta_{cm} = 90^o$ ist, erscheinen beide Protonen unter dem gleichen Streuwinkel θ_{lab}. Dieser Winkel wird als *symmetrischer Winkel* (θ_{sym}) bezeichnet. Er ergibt sich aus Gleichung 2.1 zu

$$\theta_{sym} = \arctan\sqrt{1/\gamma^2} = \arctan\sqrt{1/(1+\frac{T}{2m_p})} \tag{2.2}$$

Zur Realisierung der mit der Energie variierenden Koinzidenzen wird eine programmierbare Triggerschaltung verwendet. Ihr Blockschaltbild findet sich in Abb. 2.6. Das entscheidende Modul dabei ist die sog. *MLU* ("Memory Lookup Unit"). Dabei handelt es sich um einen linear adressierbaren Speicher, der anders als z.B. in Digitalrechnern, ungetaktet betrieben wird. Er ermöglicht es, jeder Kombination von Eingangssignalen eine frei wählbare Kombination von Ausgangssignalen zuzuordnen. Dabei dient die Kombination von Eingangssignalen ("Bitmuster") als Adresse in den Speicher, deren programmierbarer Inhalt am Ausgang verfügbar ist. Diese Eigenschaft wird dazu benutzt, zu einer auftretenden Kombination von Treffern in den Halbringen zu Rückwärtswinkeln ($\theta_{cm} > 90^o$) — unter der Annahme eines elastischen Proton-Proton-Ereignisses — eine *kinematische Vorhersage* für die möglichen Treffer zu Vorwärtswinkeln zu generieren. Nummeriert man die Halbringe für jede Detektor-Halbschale von 1 bis 29 aufsteigend vom Target strahlabwärts, so bilden die Treffer der Halbringe 1–16 die Eingangsignale für die MLU, die Vorhersage wird für die Halbringe 14–29 der gegenüberliegenden Halbschale ($\Delta\varphi = 180^o$) erstellt. Die Halbringe 14–16 können aufgrund des mit der Energie variablen symmetrischen Winkels sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtswinkel-Ringe sein und finden sich daher sowohl im Eingang der MLU als auch in der Vorhersage. Die Vorhersage wird mit den Treffern in den Vorwärtswinkel-Ringen verglichen. Bei mindestens einer Übereinstimmung (Koinzidenz,"AND") gilt die kinematische Triggerbedingung als erfüllt. Die Programmierung der

MLUs geschieht über CAMAC und benötigt 3-4 ms.

Für Messungen bei fester Energie des Beschleunigers können durch geeignete Programmierung der MLU jeweils die optimalen Koinzidenzen der Halbringe eingestellt werden. Für kontinuierliche Messungen während der Beschleunigung gibt zwei mögliche Verfahren. Entweder kann der gesamte überdeckte Energiebereich zur Einstellung *einer* Vorhersage der Vorwärtswinkel-Ringe benutzt werden. Die Vorhersage ist für jeden Rückwärtswinkelring dann der Bereich an Vorwärtswinkel-Ringen zwischen der Vorhersage bei minimaler und maximaler Energie. Die Programmierung der MLUs erfolgt dann *einmal* vor Beginn der Messung.

Alternativ kann der Energiebereich der Anregungsfunktion in mehrere Teilabschnitte unterteilt werden, die *jeweils eine* neue Programmierung der MLUs erfordern. Jede Programmierung enthält dabei Vorhersagen zwischen minimaler und maximaler Energie des Teilabschnitts. Liegt ein Treffer zu Vorwärtswinkeln zwischen minimaler und maximaler Vorhersage, so wird das Ereignis als elastisch akzeptiert. Die Programmierung der MLUs geschieht dann synchron mit der COSY-Beschleunigung *jedesmal* zu Beginn eines Teilabschnitts.

Für in Kap. 4 beschriebenen Messungen während der Strahlbeschleunigung wurde aus Vereinfachungsgründen auf Umprogrammierung der MLUs während der Beschleunigung verzichtet. Die verwendeten kinematischen Vorhersagen decken so den gesamten Energiehub des Beschleunigers ab. Die Ergebnisse der Messungen sind in Kap. 4 dargestellt.

Die Triggerschaltung existiert zweimal in identischer Weise für die beiden Halbschalen des Detektors. Die in Abb. 2.6 verwendete, vereinfachende Bezeichnung "Ringe 1-16" bzw. "Ringe 14-29" bedeutet tatsächlich Halbringe gegenüberliegender Halbschalen. Zusätzlich musste aus technischen Gründen die hier vereinfacht mit 16-bit Ein- und Ausgang ausgestattete MLU durch vier Einheiten mit jeweils 8-bit Ein und Ausgang realisiert werden (s. [SCH91]).

Um durch den Trigger keine elastischen Ereignisse zu verlieren, muß dafür gesorgt werde, daß zufällige Koinzidenzen zu einem elastischen Ereignis nicht zu einer Unterdrückung führen. Dazu muß die Vorhersage "defensiv" erstellt werden, d.h. sobald in einer beliebigen Koinzidenz von Vorwärts- und Rückwärtswinkel-Treffern mindestens eine "kinematisch richtige" Kombination gemäß Formel 2.1 auftritt, wird das Ereignis akzeptiert. Das Verfahren zur Berechnung der Vorhersage-Tabellen ist im Anhang beschrieben.

2.4 Auslese, Speicherung und Totzeitmessung

Das verwendete System verfügt über die Möglichkeit, bis zu acht unabhängige Triggerquellen zu verarbeiten. Jedes der Triggersignale initiiert dabei eine eigene, in der Software festgelegte Ausleseroutine. Das Prinzip der dazu verwendeten Schaltung ist in Abb. 2.7 schematisch am Beispiel zweier Triggerquellen dargestellt. Die Schaltung erweitert sich für mehr als zwei Triggerquellen entsprechend.

Das Signal zum Start der Datenauslese wird aus dem logischen OR aller unabhängigen Triggerquellen gebildet. Dieses Signal ist nicht direkt mit dem CAMAC-Controller

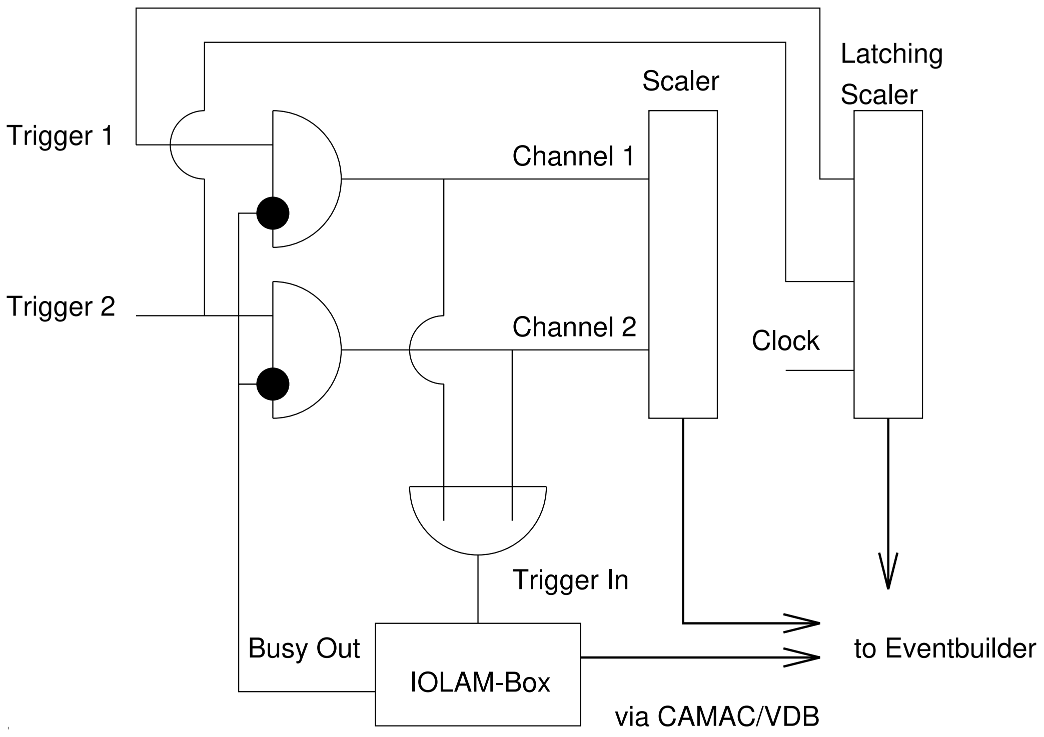


Abbildung 2.7: Prinzip der Verwendung mehrerer Triggerquellen. Die unabhängigen Triggerquellen gelangen über Antikoinzidenzen mit dem Totzeitsignal der Datenaufnahme auf ein logisches ODER. Dessen Ausgang ist mit dem "Trigger in"-Eingang der IOLAM-Box verbunden. Bei einer Ausleseanforderung über eine der Triggerleitungen wird über CAMAC/VSB die Datenauslese gestartet. Über den Mehrkanal-Zähler ("Scaler") kann entschieden werden, um welche Triggerquelle(n) es sich handelt. Der "latching scaler" dient zur Totzeitkorrektur (s. Text).

verbunden, sondern mit dem "Trigger in" Eingang der sogenannten "IOLAM-Box". Die Übermittlung des Signals an den CAMAC-Controller geschieht mit Hilfe des sog. "LAM" (= "Look At Me")-Signals, einer speziellen Signalleitung, die über CAMAC bereitgestellt wird und jedes CAMAC-Modul mit dem CAMAC-Controller verbindet.

Die "IOLAM-Box" ist ein spezielles, an der GSI Darmstadt entwickeltes CAMAC-Modul, das die Funktionen von LAM-Generierung sowie Ein- und Ausgabe von TTL-Signalen in einem Modul konzentriert. Dieses Modul wurde nachgebaut und findet bei mehreren Experimenten an COSY Verwendung. Die IOLAM-Box setzt bei einem ankommenden Triggerpuls das LAM-Signal, welches über den CAMAC-Bus an den CAMAC-Controller gelangt. Dieser generiert einen Interrupt für den "Eventbuilder" und startet so die Datenauslese. Während der gesamten Datenauslese bleibt die IOLAM-Box für weitere Triggersignale gesperrt. Dieser Zustand ist über den "Busy Out"-Ausgang der IOLAM-Box verfügbar und dient zur Sperrung der einzelnen Triggerquellen (Veto). Nach erfolgter Auslese aller Module wird über ein CAMAC-Kommando das LAM-Signal der IOLAM-Box wieder zurückgesetzt, so daß das nächste Triggersignal wieder zu einer Datenauslese führt. Für den speziellen Aufbau des EDDA-Experimentes wurde zusätzlich vorgesehen, daß die Datenaufnahme nur während des Zeit aktiv ist, in der das Target mit dem Strahl wechselwirkt.

Alle unabhängigen Trigger werden zudem in einem Mehrkanal-Zählermodul ("scaler") gezählt. Zu Beginn der Datenaufnahme sind alle Zählerkanäle zurückgesetzt. Wird nun eine Datenauslese angefordert (Signal auf mindestens einer der Triggerleitungen), so liest die Datenaufnahme-Software zuerst die Zählerstände der einzelnen Triggerquellen, vergleicht sie mit dem in der Software vermerkten Stand im vorherigen Auslesezyklus ("0" zu Beginn) und ruft nun alle entsprechenden Ausleseroutinen auf.

In der Zeit, in der die Datenaufnahme die Auslese der Digitalisierungselektronik vornimmt, können keine weiteren Ereignisse digitalisiert werden. Sie wird als "Totzeit" der Datenaufnahme bezeichnet. Zur Normierung der Zählraten und Berechnung von Wirkungsquerschnitten ist es notwendig, sowohl Totzeit als auch die Anzahl nicht digitalisierter Ereignisse zu messen. Unter der Annahme, daß die digitalisierten Ereignisse eine repräsentative Untermenge der Ereignisse insgesamt darstellen, können die Meßergebnisse auf die statistische Gesamtheit korrigiert werden.

Dazu gelangen alle einlaufenden Triggerquellen vor der Veto-Schaltung auf unterschiedliche Kanäle eines "latching scaler"-Moduls. Dabei handelt es sich um ein Vielkanal-Zählermodul, das auf ein CAMAC-Kommando hin Zählerstände *gleichzeitig* in einen internen Puffer überträgt. Nach dem Übertragen der Zählerstände (220 ns) kann der Scaler unabhängig von der Auslese über CAMAC weitere einlaufende Pulse zählen. So ist für jede Triggerquelle die Gesamtanzahl der Triggerpulse verfügbar. In einem weiteren Kanal dieses "latching scalers" werden die Signale eines Pulsgenerators mit fester Frequenz von 20 MHz ("Clock") gezählt. Nach Auslese der Zählerstände über CAMAC verfügt man damit über die Anzahl der Triggerpulse jeder Triggerquelle sowie die seit der letzten Auslese vergangene Zeit. Die von der Datenaufnahme registrierten Triggerpulse sind durch die Anzahl zugehöriger Ereignisse auf dem Magnetband gegeben. Die Auslesezeitpunkte richten sich nach der gewünschten Zeitauflösung für die Totzeitkorrektur. Im EDDA-Experiment geschieht die Auslese bei den in Kap. 4 beschriebenen Messungen alle 2.5 ms. Dieser Wert läßt sich je nach gewünschter Genauigkeit verändern, die Kapazität der Datenaufnahme limitiert die mimimalen Zeitintervalle jedoch auf ca. 1 ms. Für jede Triggerquelle ist damit eine Korrektur der durch die Datenaufnahme verursachten Totzeit in wählbarer Zeitauflösung möglich.

Die Datenauslese geschieht mit CAMAC-Controllern, die über den sog. VDB-Bus (VSB Differential Bus) mittels 80-poliger Kabel mit dem "Eventbuilder" verbunden sind. Die maximale Länge dieser Verbindung ist auf 50 m beschränkt. Bis zu 16 CAMAC-Controller (und damit auch CAMAC-Überrahmen) können über ein solches Kabelsegment mit dem VME-System verbunden werden. Mehrere solcher Kabelsegmente sind ebenfalls möglich. Die CAMAC-Controller sind "interrupt-fähig", d.h. sie können auf ein Signal eines anderen CAMAC-Moduls hin (LAM) den laufenden Prozeß auf der CPU unterbrechen und die Auslese der Digitalisierungselektronik anfordern. Dies ist im Gegensatz zum sog. "Polling", wobei die CPU zyklisch den Zustand der Perepheriegeräte (hier der CAMAC-Module) überwacht und ggf. die Auslese startet, das effizientere und in der Regel auch schnellere

Verfahren.

Als "Eventbuilder"wird ein VME Einplatinenrechner auf Basis des Motorola 68030 mit 20 MHz Taktfrequenz und 8 MByte RAM (Random Access Memory) verwendet. Er verfügt über Schnittstellen zu VME/VSB, SCSI und Ethernet. Wie oben beschrieben, erfolgt die Ankopplung an CAMAC über den VSB (VME Side Bus, der mittels einer Treiberschaltung als sog. VDB (VSB Differential Bus) über 80-polige Kabel auf bis zu 50 m verlängert werden kann.

Die Datenspeicherung geschieht mittels einer Magnetband-Einheit vom Typ EXAbyte 8500, einer Adaptierung der Video-8 Technologie. Sie ermöglicht die Speicherung von bis zu 5 GByte pro Magnetbandkassette bei einer kontinuierlichen Transferrate bis zu 500 KByte/sec. Die Bandeinheit ist über "SCSI" (**S**mall **C**omputer **S**ystems **I**nterface), einem standardisierten Bussystem speziell zum herstellerunabhängigen Anschluß von Festplattenspeichern und Bandeinheiten mit der CPU verbunden. Ebenfalls über SCSI ist eine 170 MByte Festplatte angeschlossen, die das Betriebssystem OS/9 sowie die Datenaufnahme-Software enthält.

Über "Ethernet" — ein serielles Übertragungsverfahren unter Verwendung von Koaxialkabeln — ist es möglich, eine Teilmenge der aufgenommenen Daten an einen oder mehrere Analyserechner zu übermitteln (ca. 50 KByte/sec.). Der hier verwendete Ethernet-Kabeltyp ermöglicht insgesamt eine Kabellänge von 180 m.

Der eingesetzte Analyserechner basiert auf dem MIPS 3000 Prozessor und arbeitet mit 25 MHz Taktfrequenz. Er verfügt über SCSI sowie zwei unabhängige Ethernet-Schnittstellen zur Trennung der Experimentdaten von der Kommunikation mit Rechnern der COSY-Leittechnik. Als Betriebssystem wird "ULTRIX V4.3", einer Variante des UNIX-Betriebssystems verwendet. Die Verwendung von UNIX führt zu einem hohen Maß an Unabhängigkeit von Hard- und Softwareherstellern und ermöglicht z.B. die einfache Kommunikation mit Rechnern der COSY-Leittechnik trotz unterschiedlicher Rechnerarchitektur. Durch das netzwerkfähige, standardisierte "X-Window" System als Grafikschnittstelle können z.B. Analysegrafiken während der Messung mit Rechnern der COSY-Leittechnik ausgetauscht werden. Der Anschluß von weiteren Analyserechnern an das Experiment-Netzwerk ist ohne weiteres möglich und in den bisherigen Meßzeiten erprobt.

Bei der für den "Eventbuilder" verwendeten Software handelt es sich um eine Adaptierung von "TDAS" (**T**emporary **D**ata **A**cquisition **S**ystem) der GSI Darmstadt [LIN89]. Das System wurde an die Erfordernisse der COSY-Experimente angepaßt und erweitert. Eine ausführliche Darstellung der Software findet sich in [TDA94]. Im folgenden sind die wesentlichen Eigenschaften dargestellt. Eine grafische Übersicht gibt Abb. 2.8.

TDAS ist auf dem "Eventbuilder" unter dem Echtzeit-Betriebssystem OS-9 implementiert. Dieses Betriebssystem ermöglicht es u.a., mehrere Programme durch Verteilung der Prozessorzeit quasiparallel abzuarbeiten ("Multitasking"). Ein solches, konkurrierend mit anderen laufendes Programm nennt man "Prozeß". Auch in der Implementation von TDAS laufen mehrere konkurrierende Prozesse, um die Effizienz des Systems zu maximieren. Beispielsweise kann, während ein Prozeß auf Ein- oder Ausgabe wartet, die CPU-Zeit einem anderen, unabhängigen Prozeß zugeteilt werden. Die Teilaufgaben von TDAS sind dabei streng auf die einzelnen Prozesse verteilt. Die auf eine Ausleseanforderung ("Interrupt")

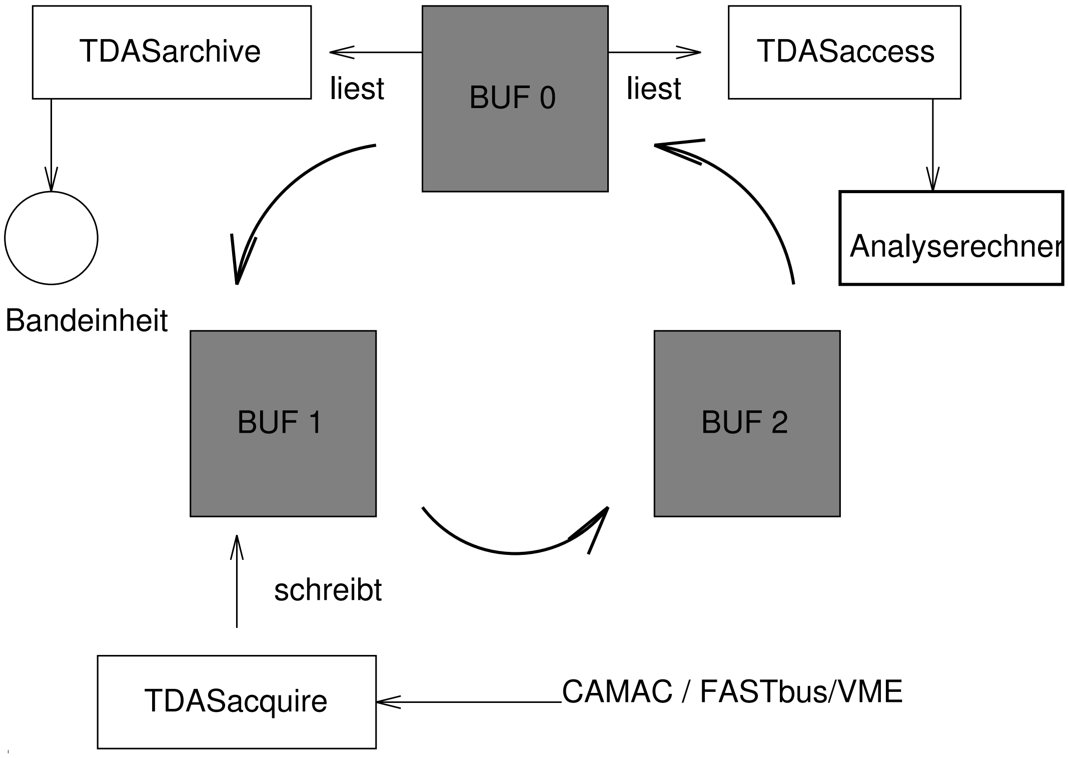


Abbildung 2.8: Kern des TDAS-Programmsystems. Der Prozeß "TDASacquire" liest die-Daten über VDB aus den CAMAC-Modulen und legt sie in zyklisch organisierten Hauptspeicherbereichen ("BUF0-BUF2") ab. Der Prozeß "TDASarchive" liest diese Daten und transferiert sie auf die Bandeinheit. Parallel dazu können die Daten optional von einem oder mehreren "TDASaccess"-Prozessen an Analyserechner übertragen werden.

hin gelesenen Daten der Digitalisierungselektronik werden nicht direkt auf die Bandeinheit transferiert. Statt dessen werden sie von dem Ausleseprozeß (TDASaquire) zunächst in Ringpuffern, d.h. Hauptspeicherbereichen des Systems, die zyklisch organisiert sind, abgelegt. Ein separater Prozess (TDASarchive) liest asynchron dazu den Inhalt der Ringpuffer und schreibt die Daten auf Magnetband. Über weitere Prozesse (TDASaccess) können außerdem Daten aus den Ringpuffern über Ethernet an einen oder mehrere Analyserechner übertragen werden. Das verwendete Datenformat ist einfach und in [TDA94] beschrieben. Mit Hilfe dieser Beschreibung ist es leicht möglich, Anwenderprogramme zur Datenkontrolle während der Messung auf einem angeschlossenen Analysrechner zu implementieren.

Die genannten drei Prozesse bilden den Kern der Datenaufnahme. Zusätzlich wurden eine Reihe von Steuerungs- und Kontrollprozessen implementiert, die z.B. die Hochspannungsversorgungen für die Photovervielfacher, die Diskriminatorschwellen sowie die Verzögerungszeiten der Delay-Module einstellen, protokollieren und überwachen [DIE94]. Diese sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abb. 2.8 nicht dargestellt.

Das EDDA-Experiment ist außerdem auf Diagnosedaten der COSY-Leittechnik, wie z. B. Strahlprofilmonitore angewiesen. Zur Protokollierung dieser Daten auf dem Magnetband wurden zusätzliche Programme entwickelt, die mit den Rechnern der COSY-Leittechnik kommunizieren und die benötigten Daten über den Analyserechner an den Eventbuilder transferieren. Diese Daten sind verfügbar, wurden jedoch bei den in Kap. 4 dargestellten Messungen nicht verwendet.

2.5 Weitere Detektorkomponenten

Die Außenschale des Detektors wird durch weitere Detektorkomponenten ergänzt. Im einzelnen sind dies die Innenschale des Detektors, das Lasermonitor-System, der Sekundärelektronen-Monitor (SEM) sowie die PIN-Dioden. Zum Zeitpunkt der Messungen befanden sich Innenschale und Lasersystem noch im Aufbau, so daß sie in Kap. 4 nicht diskutiert werden. Einzelheiten zur Innenschale finden sich in [WIE94], das Lasersystem ist in [RAD94, EIS94] beschrieben. Details zum Sekundärelektronen-Monitor sowie zu den PIN-Dioden sind in [SCE94] beschrieben.

Die 640 Einzelsignale der szintillierenden Fasern der Innenschale werden mit Hilfe des "PCOS III"-Systems der Firma LeCroy ausgelesen. Dieses modulare — ursprünglich für Drahtkammern entwickelte — System ermöglicht es, eine große Anzahl von Signalen zu diskriminieren und "Treffer", also Signale oberhalb einer Schwelle festzuhalten. Die Trefferinformation ist über ein CAMAC-Modul ("PCOS-Interface") in komprimierter Form verfügbar. Nur die Nummern der getroffenen Fasern werden übermittelt. Dies ermöglicht eine starke Reduzierung der Datenmenge. Die Auslese erfolgt durch den Trigger der Außenschale. Der Einbau und die Inbetriebnahme der Innenschale ist für 1995 vorgesehen. Das PCOS-System zur Auslese von szintillierenden Fasern ist jedoch auch Bestandteil des MOMO-Experiments und konnte dort mit Hilfe des Datenaufnahmesystems bereits erfolgreich im Experimentierbetrieb eingesetzt werden.

Das Lasersystem dient zur Überwachung von Funktion und Linearität der Außenschalen-Photomultiplier. Dazu wird von einem Laser erzugtes Licht in die Lichtleiter der Szintillatoren eingekoppelt. Ein Referenzsystem aus Halbleiterzählern sorgt für die Kalibrierung der eingespeisten Lichtmenge. Das Lasersystem liefert einen eigenen, unabhängigen Trigger. Alle Informationen werden teils durch die vorhandene Digitalisierungselektronik der Außenschale, teils durch weitere CAMAC-Module übermittelt. Erste Tests des Systems wurden in 1994 erfolgreich durchgeführt [GRE95, MUE95].

Um die sich verändernde Luminosität während der Messung zu erfassen, stehen zwei unabhängige Meßverfahren zur Verfügung. Ziel dabei ist eine hohe *relative* Genauigkeit zur Messung der Anregungsfunktionen.

Durch elastische Streuung der Strahlprotonen mit Hüllenelektronen im Targetmaterial können sog. δ-Elektronen (Rückstoßelektronen hoher Energie) aus dem Targetfaden herausgelöst werden. Der differentielle Wirkungsquerschnitt für diese Reaktion ist sehr genau bekannt und läßt sich z. B. mit Hilfe der Rosenbluth-Formel [PER87] berechnen. Die δ-Elektronen werden unter einem Winkel θ_{lab} von 40^o durch Halbleiterzähler (PIN-Dioden) nachgewiesen. Die Zahl der δ-Elektronen, die die PIN-Dioden erreichen, ist prinzipiell sehr genau berechenbar. Zusätzlich durchdringen jedoch noch andere Teilchen (p,π) die Diode.

Sie können aufgrund ihres unterschiedlichen Energieverlustes in der Diode prinzipiell von den Elektronen unterschieden werden. Jedoch reicht die aus geometrischen Gründen verwendete Schichtdicke der Halbleiterzähler nicht aus, um eine klare Trennung von Elektronen und anderen Teilchen zu ermöglichen. Daher ist eine em absolute Luminositätsbestimmung mit relativ großem Fehler behaftet, die Information zur em relativen Luminosität ist jedoch gut. Bei den hier beschriebenen Messungen waren drei PIN-Dioden in Vertiefungen des EDDA-Strahlrohres unter $\varphi = 0^o, 90^o$ und 270^o sowie $\theta_{lab} = 40^o$ mit einer Fläche von je 1 cm^2 montiert. Die Pulse der PIN-Dioden werden verstärkt, diskriminiert und in einem weiteren Vielkanal-Zählermodul ("latching scaler", s.o.) akkumuliert. Zusätzlich werden die Pulshöhen der PIN-Dioden durch ADCs statistisch untersetzt erfaßt, um anhand der Spektren eine Kontrolle der Signale zu ermöglichen. Das logische ODER der untersetzten, diskriminierten PIN-Dioden-Signale bewirkt zusätzlich eine unabhängige Triggerquelle für die Datenaufnahme, welche die Auslese der PIN-Dioden-ADCs bewirkt.

Sowohl Strahlprotonen als auch δ-Elektronen können durch Kleinwinkelstreuung niederenergetische Elektronen aus der Oberfläche des Targetfadens herauslösen. Diese sog. Sekundärelektronen sind sehr zahlreich und machen den bei weitem größten Teil des Stoms der insgesamt das Target verlassenden Elektronen aus. Seine Größe ist von der Oberflächenbeschaffenheit des Targets abhängig. Der Sekundärelektronenstrom ist daher nur mit großem systematischen Fehler berechenbar, so daß eine *absolute* Luminositätsbestimmung damit ebenfalls nicht sinnvoll ist. Auch dieser Effekt liefert jedoch ein gutes *relatives* Signal. Zur Messung des Sekundärelektronenstroms wird der Targetfaden dünn mit Aluminium leitend beschichtet [MOS91, MOS94] und über ein zu diesem Zweck entwickeltes empfindliches Amperemeter mit hoher Abtastfrequenz geerdet [SCE94]. Das Amperemeter wandelt die ermittelten Stromwerte im Picoampere-Bereich in eine proportionale Frequenz um, die in weiteren Kanal des "latching scalers", der bereits die Pulse der diskriminierten PIN-Dioden-Signale zählt, gezählt wird. Wie in Abschnitt 2.4 dargestellt, zählt ein weiterer Kanal dieses Moduls zusätzlich die von einem Pulsgenerator konstanter Frequenz erzeugten Pulse. Der Zähler wird regelmäßig (s.u.) über CAMAC ausgelesen. Die Zeitintervalle der Auslese schwanken jedoch bedingt durch die Totzeit der Datenaufnahme im Bereich von einigen μs. Daher bietet erst die Normierung des Zählerinhaltes auf die parallel mitgezählte, bekannte Festfrequenz einen hinreichend genauen, dem über das Zeitintervall gemittelten Sekundärelektronenstrom proportionalen Wert. Zusätzlich liefert ein Analogausgang des Picoamperemeters Informationen zur Strahldiagnose für die COSY-Leittechnik.

Das Triggersignal für die Auslese des "latching scalers" wird von einem Pulsgenerator mit fester Frequenz erzeugt. Für die in Kap. 4 beschriebenen Messungen wurde eine Frequenz von 400 Hz verwendet. Das entspricht einer Zeitauflösung von 2.5 ms fur die Luminositätsbestimmung und Totzeitmessung (s.o.). Abweichend von Abb. 2.7 wird dieses Triggersignal wird nicht in Antikoinzidenz mit dem "Busy Out"-Signal betrieben, da sonst eine hohe Rate anderer Triggerquellen zu einer Unterdrückung dieser Triggerquelle führen würde.

2.6 Synchronisation mit dem Beschleunigerzyklus

Durch die Verwendung eines internen Targets ist das EDDA-Experiment auf Synchronisation mit dem Beschleunigerzyklus angewiesen. Dies bedeutet die phasenrichtige Steuerung des Targets sowie die Kenntnis der Strahlenergie bei Messung während der Beschleunigung.

Das Fadentarget ist in seiner Gabelhalterung auf einem Linearmotor so angebracht, daß es senkrecht zur Strahlrichtung verfahren werden kann. Eine detaillierte Beschreibung der Targetmechanik und -steuerung findet sich in [MOS94]. Zur Steuerung des Fadentargets in Synchronizität mit dem COSY-Beschleunigungszyklus ist im VME-Überrahmen ein sogenannter "Timing-Receiver" zum Anschluß an das COSY-Zeitmarkierungssystem ("Timing-LAN") installiert. Das Timing-LAN ist ein auf Ethernet aufgebautes lokales Netzwerk, welches alle Beschleunigerkomponenten wie Magnetnetzgeräte und Diagnoseelemente synchronisiert steuert. Die Kommunikation über Ethernet geschieht in logischen Infomationseinheiten, sog. Paketen oder "Frames", die von allen an das Netzwerk angeschlossenen Modulen gleichberechtigt empfangen werden.

Die Zeitgenauigkeit des Timing-LANs basiert auf der Tatsache, daß lediglich ein einziges Modul innerhalb des LANs (der "Timing-Sender") Ethernet-Pakete in einem festen zeitlichen Abstand (1 ms) sendet und die Dekodierung durch feste, elektronische Schaltungen in den Timing-Receivern realisiert ist. Jeder Timing-Receiver besitzt zwei Ausgänge, die TTL Pulse von 100 ns Dauer generieren können, sowie eine Reihe von weiteren Ausgängen, die TTL-Pegel liefern. Vereinfacht enthalten die übermittelten "Frames" folgende Informationen:

- Welcher "Timing-Receiver" (oder welche Gruppe von "Timing-Receivern") soll adressiert werden ?
- Wann — relativ zum Empfang des "Frames" — sollen die TTL-Pulsausgänge aktiviert werden ? Die Zeitauflösung beträgt dabei 100 ns.
- Welche TTL-Pegelausgänge sollen gesetzt oder gelöscht werden ?

Für das EDDA-Experiment werden die beiden TTL-Pulsausgänge benutzt, um das Fahren des Targetmotors von einer Ruheposition außerhalb des Strahls zur eigentlichen Meßposition ("Target in") sowie das Fahren aus der Meßposition in die Ruheposition auslösen. Die Zeitpunkte relativ zu den einzelnen Phasen des Beschleunigungszyklus sind dabei über einen Rechner der COSY-Leittechnik frei wählbar. Im Intervall zwischen "Target Out" und "Target In" ist die Datenaufnahme gesperrt, um ungültige Ereignisse, wie sie z.B. durch Strahlverluste bei der Injektion auftreten, zu unterdrücken.

Zur Messung während der Beschleunigung des COSY-Strahls ist es notwendig, die Energie zu jedem Ereignis zu bestimmen. Dazu wird der Zeitpunkt jedes Ereignisses relativ zur COSY-Zykluszeit gemessen. Aus dieser Zeitinformation kann zusammen mit den COSY-Beschleunigungsparametern in Abhängigkeit von der COSY-internen Zeit die jeweilige Strahlenergie bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird in einem weiteren "latching scaler" Modul eine Konstantfrequenz von 10 KHz mitgezählt. Dieser Zählerstand wird mit dem Eintreffen des COSY-Signals zum Hineinfahren des Targets in den Strahl gelöscht und zusammen mit dem "latching scaler" zur Totzeitbestimmung (s. Abschnitt 2.4) in regelmäßigen Abständen (typisch 2.5 ms) ausgelesen. Der Nullpunkt der experiment-internen Zeitmessung ist so mit dem Nullpunkt der COSY-Zeit korreliert. Die bereits oben erwähnte, in dem "latching scaler" zur Totzeitbestimmung mitgeführte Konstantfrequenz von 20 MHz ermöglicht die genaue Bestimmung der einzelnen Zeitintervalle. Durch die gewählte Auslesefrequenz von 400 Hz ergibt sich bei der COSY-typischen Rampengeschwindigkeit von $\frac{\delta p}{\delta t} = 1.15\frac{MeV/c}{s}$ eine Schrittweite von $\delta p = 2.875 MeV/c$ für die Anregungsfunktion. Bei Bedarf kann die Schrittweite durch Wahl einer höheren Auslesefrequenz noch sinnvoll bis $\delta p \approx 1.5 GeV/c$ verringert werden.

Um bei der Bestimmung der Strahlenergie Redundanz zu gewinnen, wird zusätzlich die Stromvorgabe für einen Dipolmagneten des Beschleunigers während der Beschleunigung erfasst. Die Netzgeräte der COSY-Magneten verfügen dazu über einen Monitorausgang, der eine der Stromvorgabe proportionale Spannung zur Verfügung stellt. Diese Spannung wird in eine proportionale Frequenz gewandelt und im "latching scaler", der auch zur Erfassung von SEM-Signal und PIN-Dioden-Signalen dient (s. Abschnitt 2.5), gezählt. Die Erfassung des Zusammenhangs zwischen dem Vorgabewert des Stroms und tatsächlichem Magnetfeld und damit Strahlimpuls ist Gegenstand der Diagnose der COSY-Leittechnik.

2.7 Zusammenfassung

Die Datenaufnahme im EDDA-Experiment wurde gemäß der Empfehlungen der CANU-Kommission "Datenaufnahme COSY" [CAN91] entworfen und aufgebaut. Durch die Verwendung von Standardkomponenten und modularem Aufbau mit streng getrennter Funktionalität konnte das System für weitere Experimente nutzbar gestaltet werden. Das System ist leicht an unterschiedliche Experimente anzupassen und ermöglicht einen stabilen Experimentierbetrieb. Die vorgesehenen Leistungsdaten sind für die geplanten und im Meßbetrieb befindlichen COSY-Experimente ausreichend und werden eingehalten.

Im EDDA-Experiment ist das System in der Lage, unterschiedliche Triggerquellen (Außenschale, Luminositätsbestimmung, Laser-Monitorsystem) und die zugehörige Daten der Digitalisierungselektronik bei genauer Bestimmung der Totzeit zu verarbeiten. Die Synchronisation mit dem COSY-Zyklus erfolgt über die Anbindung an das "Timing-LAN" der COSY-Leittechnik. Für die Messung von Anregungsfunktionen während der Beschleunigung liefert das System die Möglichkeit der Energieauflösung im MeV-Bereich. Der Trigger der Außenschale ermöglicht die schnelle Erkennung elastisch gestreuter Protonen anhand von kinematischer Koinzidenz.

Kap. 4 zeigt anhand von Daten, die in den Meßperioden vom 13.–18.6.1994 sowie vom 22.–27.8.1994 gewonnen wurden, die Funktionsfähigkeit des Systems.

3 Datenanalyse

Eine Analyse der von der Datenaufnahme registrierten und abgespeicherten Ereignisse (Rohdaten) wird in einem Beschleunigerexperiment typischerweise in zwei Phasen nötig:

Während des Experiments ("Online") müssen die Rohdaten in einer Grobanalyse so aufbereitet werden, daß Detektorfunktion und Strahlqualität schnell beurteilt und nötigenfalls schnell nachgebessert werden können. Unerwartete Befunde erfordern eine rasche und einfache Änderung oder Erweiterung der Analyse durch den jeweiligen Benutzer, um Ursachen zu ergründen und Entscheidungen zum weiteren Meßprogramm zu treffen. Für diese Situation wurde mangels verfügbarer Alternativen im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Programmpaket "YODA" (**Y**et Another **O**nline **D**ata **A**nalyzer) entwickelt.

Nach Ende der Meßperiode ("Offline") werden die Daten einer Feinanalyse unterzogen, bei der Einschränkungen hinsichtlich Zeit und Rechnerkapazität sowie die Forderung nach Benutzerfreundlichkeit eine weitaus geringere Rolle spielen. Es war deshalb überraschend, daß sich YODA auch in diesem Bereich als nützlich erwies.

In der Weiterentwicklung wurde darauf geachtet, daß YODA für "Online"- und "Offline"-Betrieb gleichermaßen geeignet ist. Durch flexible Gestaltung des Programms war es zudem möglich, für die Experimente EDDA und MOMO das weitgehend identische Programm zu verwenden. Die Flexibilität des Programms wird durch die Verwendung einer zur *Laufzeit* des Programms verfügbaren Programmiersprache erreicht, die es dem Benutzer emöglicht, physikalische Analysen schnell zu erstellen, ohne sich mit technischen Details des Datenzugriffs befassen zu müssen. Die Vorteile dieses Konzepts sowie der Aufbau des Programms werden im folgenden erläutert. Details zur Implementierung und Benutzung finden sich in [YOD94]. Beispiele zur Anwendung gibt [ROH94b].

3.1 Konzeption

Die typische Datenanalyse heutiger Experimente gliedert sich für gewöhnlich in zwei Schritte.

- Zunächst werden Operationen auf *Einzelereignisse* zur Aufbereitung der Daten angewendet. Dabei gilt es z.B., aus *Rohdaten* wie digitalisierten Pulshöhen und Flugzeiten physikalische *Parameter* wie Winkel und Impulse zu gewinnen. Dazu sind die Fähigkeiten einer im folgenden "traditionell" genannten Programmiersprache (z.B. "FORTRAN" oder "C") nötig. Im allgemeinen müssen die Rohdaten arithmetischen

Operationen unterzogen werden, Iterationen ("Schleifen", "loops") und logische Entscheidungen ("if/else") müssen möglich sein. Die gewonnenen Parameter (und ihre zugehörigen Rohdaten) werden zu statistischen Objekten wie ein- und zweidimensionalen Histogrammen (Spektren) akkumuliert. So rekonstruiert man z.B. im EDDA-Experiment aus den digitalisierten Pulshöhen der Außenschalen-Szintillatoren (Rohdaten) durch Betrachtung des Verhältnisses benachbarter Stäbe Azimutwinkel (Parameter). Berechnet man nun die Winkeldifferenzen für Treffer eines Ereignisses, so erwartet man für elastisch gestreute Protonen eine Häufung bei $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2| = 180^o$.

- In einem zweiten Schritt werden die statistischen Verteilungen der Parameter untersucht. Dies bedeutet typischerweise graphische Darstellung der Histogramme, Anpassungsrechnungen ("Fits"), Vergleich mit berechneten Werten usw.. Im EDDA-Experiment werden z.B. potentiell elastische Ereignisse anhand der Verteilung der in einem ersten Schritt gewonnenen Azimutwinkeldifferenzen identifiziert. Die Ereignisse werden dann durch die Bedingung, daß $\Delta\varphi = 180^o \pm \epsilon$, vorselektiert. Der Wert ϵ wird aus den Winkeldifferenzspektren bestimmt. Dieses Verfahren der Eingrenzung der Ereignismenge durch Bedingungen nennt man auch *Schnitt*,"Cut" oder "Gate".

Während für den zweiten Schritt eine Reihe von Programmen zur Verfügung stehen, die eine komfortable Verarbeitung von Histogrammen und interaktive graphische Darstellung von Daten ermöglichen, findet der erste Schritt typischerweise in einem experimentspezifischen Programm statt.

Dieses Programm ist üblicherweise in einer traditionellen Programmiersprache geschrieben. Zur Erstellung eines solchen Programms muß der Anwender i. allg. den sog. *Quelltext* des Programms verfassen. Der Quelltext muß Syntax und Semantik der verwendeten Programmiersprache genügen. Er enthält die Berechnung der Parameter und das Erzeugen der Spektren. Der *"Compiler"* — ein prozessorspezifisches Programm — überprüft den Quelltext auf syntaktische Fehler und überführt ihn ggf. in vom Prozessor ausführbare Instruktionen. Nicht vom Anwender geschriebene Unterprogramme, wie z.B. Histogrammfunktionen oder Ausgabe von Daten auf Bildschirm oder Drucker werden von einem weiteren Programm, dem *"Linker"* verfügbar gemacht. Dies geschieht durch Hinzufügen von Code aus *"libraries"* , d.h. Sammlungen von Unterprogrammen. Schließlich muß das erstellte Programm getestet und ggf. erneut Änderungen am Quelltext vorgenommen werden, bevor das Programm zur Analyse benutzt werden kann. Die Programmentwicklung ist in diesem Ansatz durch die wiederholte Abfolge der obigen Schritte (Quelltext, "Compiler", "Linker", Test) bestimmt. Die sogenannte "Turnaround"-Zeit — die Zeit, die zum einmaligen Durchlauf all dieser Schritte benötigt wird — ist typischerweise hoch und steigt mit der Größe des Programms an. Diese Tatsache bedeutet vor allem für den "Online"-Betrieb, der auf rasche Diagnosemöglichkeiten angewiesen ist und schnelle und einfach durchzuführende Änderungen an der Analyse benötigt, eine entscheidende Einschränkung. Zudem muß die laufende Analyse normalerweise zur Durchführung der Änderung unterbrochen werden.

Zudem führt ein solches Programm i. allg. festgelegte Analyseschritte aus. Es ist damit an das Experiment gebunden und bei sich änderndem Aufbau schwer anzupassen. Eine Verwendung des Programms für weitere Experimente benötigt oft umfangreiche Änderungen oder Neuprogrammierung.

Der Versuch, möglichen Änderungen des Analyseprogramms im "Online"-Betrieb vorzubeugen, resultiert oft darin, eine große Zahl potentiell zu überwachender Rohdaten und Parameter durch das Programm bereitzustellen. Das Programm wird dadurch groß, möglicherweise langsamer und i. allg. sehr komplex. Sind dennoch Änderungen nötig, benötigt der Anwender oft spezielle Kenntnisse über das Programm und die verwendete Programmiersprache, um gezielt eingreifen zu können. Mit steigender Komplexität erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit, daß vom Anwender vorgenommene Änderungen zu Fehlern in der Analyse führen.

Die Inflexibilität behindert den Anwender bei der Analyse. Statt sich auf den physikalischen Aspekt der Daten konzentrieren zu können, rücken technische Aspekte des Datenzugriffs in den Vordergrund.

Eine mögliche Lösung des Problems besteht in einer eigens für Datenanalysen geschaffenen Programmierumgebung, die — abweichend vom oben beschriebenen, traditionellen Ansatz — mit einer *interpretativen* Programmiersprache arbeitet. Der Benutzer erstellt dabei ebenfalls einen Quelltext für die durchzuführende Analyse. Dieser Quelltext wird jedoch nicht in Maschinencode übersetzt ("Compiler") , sondern unter der Kontrolle eines Programms — des "Interpreters" — sofort "interpretiert" und abgearbeitet. Änderungen am Quelltext führen ohne merkliche Zeitverzögerung zu entsprechenden Änderungen in der Analyse. Im EDDA-Experiment ist z.B. denkbar, die oben erwähnten Azimutwinkeldifferenzen zu Diagnosezwecken unter der Einschränkung auf bestimmte Stabszintillatoren zu betrachten. Eine solche Änderung kann bei Verwendung einer interpretativen Sprache mit sofortiger Wirkung erfolgen.

Die Verwendung einer interpretativen Sprache hat i. a. den Nachteil einer reduzierten Ausführungsgeschwindigkeit. Der Quelltext muß zunächst interpretiert werden, bevor entsprechende Prozessorinstruktionen ausgeführt werden. Außerdem ist die Abfolge der Instruktionen in der Regel weniger effizient als die durch einen "Compiler" erzeugte.

Für den "Online"-Betrieb spielt die Forderung nach hoher Ausführungsgeschwindigkeit jedoch eine untergeordnete Rolle. Die oben genannten Vorteile einer interpretativen Programmiersprache dominieren den Laufzeitvorteil eines traditionellen Programms.

Der Ansatz führte zum Entwurf des Programms YODA. Folgende Anforderungen waren dabei entscheidend:

- Alle vom Benutzer vorzusehenden Datenanalysen sollen mittels einer interpretativ arbeitenden Programmiersprache erstellt werden. Eine Analyseroutine muß *zur Laufzeit* des Programms erstellt, geändert und gelöscht werden können. Mehrere, voneinander unabhängige Analysen sollen quasiparallel[1] ablaufen. Einzelne Analysen sollen gestartet, gestoppt, geändert und gelöscht werden können, ohne andere, aktive Analyseprozeduren zu beeinflussen. Im Edda-Experiment sind z.B. die Datenanalysen

[1]Auf einem einzelnen Prozessor kann immer nur ein Programm zu einer Zeit ablaufen. In einem sog. "Multitasking"-System wird durch schnelles Umschalten zwischen verschiedenen Programmen der Eindruck parallel ablaufender Programme erreicht.

zur Kontrolle der Außenschalen-Szintillatoren und der Luminositätserfassung (PIN-Dioden, SEM) getrennt und bei Bedarf jederzeit aktivierbar. Die Analysen können unabhängig voneinander oder gleichzeitig erfolgen.

- Das Programm muß unabhängig vom verwendeten Experiment sein. Die Definition der konkreten Daten soll über Konfigurationsdateien zur Laufzeit des Programms geschehen. Dies bedeutet, daß Daten neu hinzugefügter Detektorkomponenten in die Analyse integriert werden können, ohne die laufenden Analysen abzubrechen. Im EDDA-Experiment wurde z.B. während der Messung die Beschleuniger-Hochfrequenz als zusätzliche Meßgröße in die Datenaufnahme und Analyse integriert.

- Die Programmiersprache muß einfachen, symbolischen Zugriff auf die Experimentdaten ermöglichen. Die Sprachdefinition soll eng an eine bekannte, standardisierte Sprache ("C") angelehnt sein, um die Akzeptanz für den Anwender zu erhöhen. Zusätzlich müssen Funktionen zur Erzeugung statistischer Objekte (Histogramme, etc.) bereitgestellt werden.

- Daten unterschiedlicher Formate und Quellen sollen durch das Programm verarbeitbar sein. Insbesondere sollen "Online"- wie "Offline"-Betrieb sowie die Verarbeitung von Daten aus Simulationsrechnungen möglich sein.

- Für Analyseanforderungen, die über die Möglichkeiten der verwendeten interpretativen Programmiersprache hinausgehen, muß zusätzlich eine traditonelle Programmierschnittstelle zur Verfügung stehen. Dabei ist es wichtig, daß damit vorgenommene Erweiterungen wieder Teil des interpretativen Sprachumfangs werden. Beispielsweise werden im MOMO-Experiment aus Vieldrahtkammer-Daten Teilchentrajektorien rekonstruiert. Dies geschieht in einem in der Sprache "C++" geschriebenem, von einem "Compiler" in Maschinencode übersetzten Unterprogramm. Die von diesem Unterprogramm berechneten Parameter (Winkel, Impulse) werden vom Benutzer mit Hilfe der interpretativen Sprache weiterverarbeitet.

- Das Programm soll auch als "Filter" zur Selektierung von Ereignissen dienen. Eingabedaten sollen aufbereitet, selektiert und wieder geschrieben werden können.

- Als Programm zur grafischen Darstellung und weiteren Analyse soll ein Standardprogramm zum Einsatz kommen. ("PAW++" der CERN Program Library[PAW94]).

Eine Übersicht der Datenanalyse-Software ist in Abb. 3.1 dargestellt. Daten können aus einer Datei oder als direkte Ausgabe eines anderen Programms (z.B. eine Simulation oder ein Programm zur Umformatierung) gelesen werden. Der Benutzer kann den Datenfluß jederzeit starten, stoppen und wiederaufnehmen. Vom Benutzer ist einmal für das Experiment die Struktur der zu lesenden Daten über eine Konfigurationsdatei festzulegen. Diese Datei verknüpft Rohdaten mit je einem frei wählbaren symbolischen Variablennamen, unter dem diese Daten innerhalb der Analyseprozeduren verfügbar sind. Im EDDA-Experiment sind z.B. die digitalisierten Pulshöhen der PIN-Dioden in der interpretativen

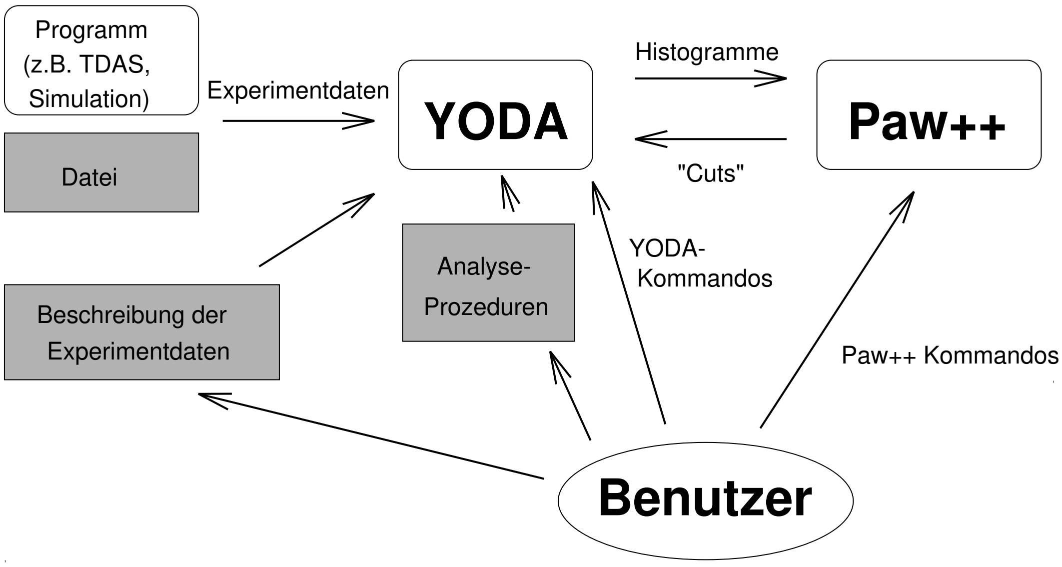


Abbildung 3.1: Struktur des YODA-Datenanalysesystems. Die Experimentdaten werden durch vom Benutzer definierte, dynamisch ladbare Analyseprozeduren verarbeitet. Die entstehenden statistischen Verteilungen werden an das Programm “PAW++” zur grafischen Darstellung und Weiterverarbeitung übertragen.

Sprache unter dem Variablennamen “`PINADC`” verfügbar. Die vom Benutzer geschriebenen Analyseprozeduren werden zu dem laufenden Programm YODA nach Bedarf hinzugefügt und entfernt. In jeder Analyseprozedur ist festgelegt, welche Rohdaten mit der Prozedur verarbeitet werden sollen. Die Abarbeitung der Rohdaten erfolgt ereignisweise sequentiell. Werden die für die jeweilige Prozedur relevanten Daten von YODA gelesen, so wird diese Prozedur automatisch aufgerufen. Die den Daten korrespondierenden Variablen innerhalb der Prozedur sind mit den Rohdaten eines Ereignisses belegt und werden in der Prozedur verarbeitet. Dann werden die Daten des nächsten Ereignisses gelesen. Die Analyse ist durch dieses Verfahren für unterschiedliche Detektorgruppen (z.B. Außenschale und PIN-Dioden im EDDA-Experiment) modular gestaltbar. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt entweder auf den Bildschirm oder in eine Datei. Zusätzlich können Parameter und Rohdaten in Form ein- und zweidimensionaler Histogramme akkumuliert werden.

Die interpretative Sprache ist eng an die Sprache “C” [KER77] angelehnt. Syntax, Operatoren, Ausdrücke (“expressions”), Anweisungen (“statements”) und der Großteil der Kontrollstrukturen (“do/while”,“if/else”etc.) wurden übernommen. Wichtige Einschränkungen sind:

- Der einzig verfügbare Datentyp sind Fließkommazahlen doppelter Genauigkeit (`double`). Weiterhin existieren Zeichenkettenkonstanten.

- Die einzig verfügbaren Dimensionen von Variablen sind Skalare oder eindimensionale Felder (“arrays”).

- Alle Variablen sind global innerhalb einer Analyseprozedur.

Trotz dieser Einschränkungen ist der Sprachumfang für typische Analyseaufgaben komfortabel. Analog zu "C" ist zusätzliche Funktionalität (Ein- und Ausgabe, mathematische Funktionen, Histogramme, etc.) in Form von Unterprogrammen ("built-in functions") verfügbar. Diese Menge an Funktionen ist durch den Anwender erweiterbar.

Die enstehenden Histogramme werden über einen von YODA und PAW++ gemeinsam benutzten Hauptspeicherbereich ("global section") zwischen diesen Programmen periodisch transferiert. So ist es möglich, den Fortgang der Analyse kontinuierlich graphisch zu verfolgen und evtl. schnell Änderungen vorzunehmen. Die Histogramme können mit PAW++ weiterverarbeitet und gespeichert werden.

Weiterhin ist es möglich, ein- und zweidimensionale Schnittbedingungen auf statistische Verteilungen mit PAW++ grafisch interaktiv zu definieren und innerhalb der Analyseprozeduren zu benutzen. Dabei handelt es sich im eindimensionalen Fall um ein Intervall im Wertebereich einer Variablen, im zweidimensionalen Fall um die durch ein geschlossenes Polygon begrenzte Fläche in der Ebene, die durch die Wertebereiche zweier Variablen aufgespannt wird. Beispielweise können für eine geeignete Anordnung aus Energieverlust- (ΔE) und Gesamtenergie-Halbleiterzähler (E) unterschiedliche Ejektile (p,d) eines Streuprozesses entsprechend ihrer Verteilung in der ΔE–E-Ebene durch ein umschließendes Polygon selektiert werden. Innerhalb der Analyseprozeduren kann abgefragt werden, ob Werte inner- oder außerhalb dieser Schnittbedingungen liegen. Da die Schnittdefinitionen von PAW++ nicht über die "global section" verfügbar sind, werden sie über eine Datei definiert. Dies hat den Vorteil, daß Schnittdefinitionen automatisch über die Laufzeit der Analyse hinaus verfügbar sind.

Ebenfalls ist es möglich, Rohdaten mittels des YODA-Programms aufzubereiten, nach bestimmten Kriterien zu filtern und wieder zu speichern. Dies ermöglicht die Selektion von Ereignissen zur späteren, effizienteren Analyse. Innerhalb der Analyseprozeduren berechnete Parameter können den Ereignissen hinzugefügt werden und stehen für weitere Bearbeitungen zur Verfügung.

3.2 Aufbau

Kern des Programms YODA ist der *Interpreter* zur Abarbeitung der vom Benutzer vorgegebenen Analyseroutinen (vgl. Abb.. 3.2). Er basiert auf dem in [KER84] beschriebenen Interpreterprogramm "hoc" (**h**igh **o**rder **c**alculator) für einfache arithmetische Aufgaben. Das Programm bedient sich der Möglichkeiten des Programms "yacc" (**Y**et **A**nother **C**ompiler **C**ompiler) [JOH75], einem Standard-Werkzeug des Compilerbaus in der UNIX-Programierumgebung. Ausgehend von einer formalen Sprachdefinition (Grammatik) erzeugt yacc Code für ein Programm (i. allg. "parser" genannt), welches eine Eingabe gemäß der Sprachdefinition akzeptiert und entsprechende Aktionen auslöst, z.B. ausführbaren Maschinencode generiert ("Compiler") oder aber Berechnungen direkt ausführt ("Interpreter"). Dieser automatisch generierte Code ist Bestandteil des YODA-Programms und ist für die Verarbeitung der vom Benutzer festgelegten Analyseroutinen verantwortlich. Die

Verwendung eines Codegenerators wie "yacc" erleichtert die Erstellung und Wartung des Interpreters wesentlich.

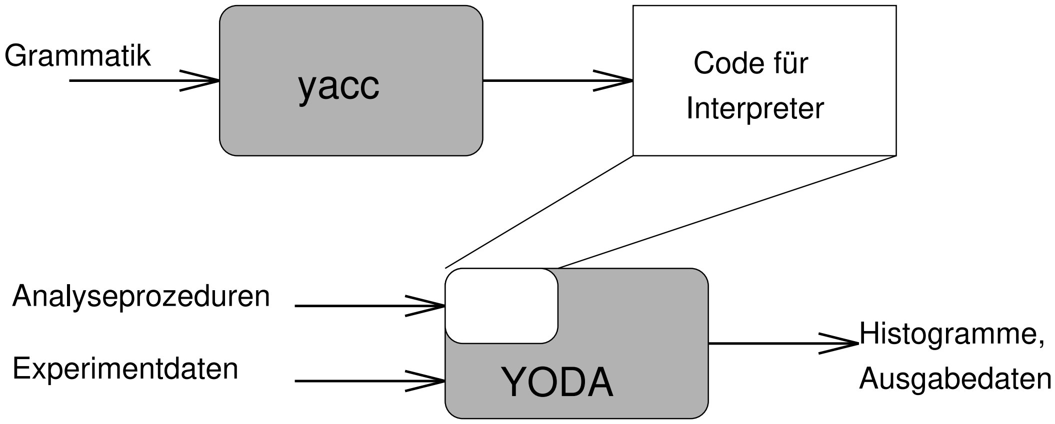


Abbildung 3.2: Der Interpreter-Teil des YODA-Programms wird gemäß einer formalen Sprachdefinition mit Hilfe des "yacc"-Programms automatisch generiert. Er ermöglicht das Abarbeiten der vom Benutzer geschriebenen Analyseprozeduren.

Die dem Programm "hoc" zugrundeliegende Grammatik wurde für YODA erweitert und modifiziert, um die Sprachdefinition näher an die Programmiersprache "C" zu bringen und die für die Datenanalyse notwendige Funktionalität bereitzustellen. Weiterhin wurde die Geschwindigkeit des interpretativen Codes maximiert, um auch für "Offline"-Analysen gute Bedingungen sicherzustellen.

Für die Implementierung von YODA wurde die Programmiersprache "C++" gewählt [STR93]. Durch ihre Unterstützung objektorientierter Programmierung (z.B. [BOO91]) konnte eine hohe Entwicklungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Wartbarkeit und Verständlichkeit des Quelltextes erreicht werden, so daß die weitere Programmpflege erleichtert wird. Die Implementierung ist weitgehend Hard- und Softwarehersteller-unabhängig und damit relativ leicht auf andere Rechner und UNIX-Varianten portierbar. Zur Zeit exitieren Portierungen für "Ultrix 4.3" und "OSF/1 3.0". Das Programm wurde zur einfacheren Benutzerführung mit einer grafischen Oberfläche unter dem "X-Windows"-System [XWI90] ausgestattet. Dies geschah unter Verwendung des "Tcl/Tk-Toolkits" [OST91], einer frei verfügbaren Programmbiliothek zur Grafikprogrammierung schnell und komfortabel.

3.3 Ergebnisse und Bewertung

Der wesentlichste Nachteil der Verwendung von interpretativem Code ist die deutlich höhere Laufzeit im Vergleich zu kompiliertem Code, wie er bei Verwendung traditioneller Werkzeuge und Sprachen (z.B. FORTRAN, PASCAL, C) entsteht. Für die im Programm YODA gewählte Implementierung des "hoc"-Interpreters liegt die Laufzeit des intepretierten Codes je nach Komplexität etwa drei- bis zehnmal höher als die Laufzeit von äquivalenten, in reinem Maschinencode ablaufenden Routinen. Dennoch hat sich die Verwendung einer interpretativen Sprache für alle bisherigen Anwendungen nicht als limitierend erwiesen.

Der damit erreichbare Datendurchsatz liegt je nach Komplexität der Analyse typischerweise bei einigen hundert Ereignissen/s auf durchschnittlichen Arbeitsplatzrechnern. Die ständige grafische Kontrollmöglichkeit erlaubt es, den Fortgang der Analyse zu verfolgen und bei Erreichen einer ausreichenden Statistik die Analyse zu beenden, ohne eine feste Anzahl von zu prozessierenden Ereignissen vorzugeben.

Als entscheidender Vorteil hat sich gezeigt, daß durch die Verwendung interpretativer und damit schnell änderbarer Analyseroutinen ein signifikanter Zuwachs an Entwicklungsgeschwindigkeit gegenüber Analysen in einer traditionellen Programmiersprache erreicht wird, der die Laufzeitvorteile von kompiliertem Programmcode deutlich überwiegt. Auch für den "Offline"-Betrieb stellte sich diese Eigenschaft als nützlich heraus, so daß YODA auch dort zum Einsatz kommt.

Kritisch rechenintensive Vorgänge bei der Analyse können jederzeit in effizienteren, "C"- bzw. "C++"-Code umgewandelt werden. Diese — mit nahezu optimaler Geschwindigkeit ablaufenden Routinen — sind wiederum als flexible Bausteine des interpretativen Sprachumfangs verfügbar. So kann nach der Entwicklungsphase des Analyseverfahrens — falls nötig— die Geschwindigkeit durch Umwandlung in kompilierten Code optimiert werden. Dies ist durch die syntaktische Ähnlichkeit von "hoc" und "C" sehr einfach möglich.

Für alle bisherigen Einsatzgebiete hat sich das verwendete Konzept als sehr flexibel erwiesen. Viele Analysen unterschiedlichster Experimentdaten konnten in kurzer Zeit — oft während der Messung — entwickelt und durchgeführt werden. Das weitgehend identische Programm ist ist für "Online"- wie "Offline"—Betrieb der Experimente EDDA und MOMO im Einsatz. Weiterhin war es möglich, Daten aus Simulationsrechnungen über eine einfache Schnittstelle homogen in die Analyse einzubinden.

Trotzdem bietet auch die für YODA erweiterte Programmiersprache "hoc" nicht alle Möglichkeiten einer Sprache wie z.B. "C". In einigen Anwendungsfällen machten es die Einschränkungen im Sprachumfang nötig, auf die Formulierung in "C" oder "C++" auszuweichen. So sind z.B. kompliziertere Verfahren zur Winkelrekonstruktion (vgl. Kap. 4.3) typischerweise als "C++"-Unterprogramme realisiert, die von den entsprechenden Analyseroutinen aufrufbar sind. Eine weitere Einschränkung liegt im Verfahren der Datenübermittlung an das Darstellungsprogramm "PAW++". Die maximale Größe des gemeinsamen Speicherbereichs limitiert die Anzahl der gleichzeitig verfügbaren Histogramme. Für Analysen mit hohem Speicherbedarf befindet sich daher ein in das YODA-Programm integrierter Programmteil zur einfachen Darstellung von prinzipiell beliebig vielen Histogrammen in der Testphase. Diese Histogramme können über eine Datei an PAW++ zur weiteren Bearbeitung transferiert werden.

Ein wichtiges Ziel war die einfache Bedienung des Programms und einfacher Zugriff auf die Experimentdaten, um physikalische Fragestellungen in den Vordergrund zu stellen. Tatsächlich zeigte sich, daß alle Anwender des Programms nach kurzer Einarbeitung Analysen ohne Zuhilfenahme von "Expertenwissen" durchführen konnten. Erwartungsgemäß war jedoch die Einarbeitungszeit für Anwender, die bereits über Programmiererfahrung (speziell mit der Sprache "C") verfügten, kürzer. Dieser Anwenderkreis war auch schneller in der

Lage, weitergehende Fähigkeiten des Programms wie die Erweiterung des Sprachumfangs durch eigene Funktionen zu nutzen. Verbesserungen im Bereich von Benutzerführung und Bedienbarkeit, sowie verbesserte Fehlerbehandlung sind Gegenstand der Weiterentwicklung.

4 Auswertung

In den Meßperioden vom 13.8. – 18.8.1994 sowie vom 22.8. – 27.8.1994 wurden sowohl Messungen bei verschiedenen festen Energien (“Flat-Top”), als auch kontinuierliche Messungen während der Beschleunigungsphase vorgenommen. Das Datenaufnahme und Datenanalysesystem arbeitete während dieser Messungen zuverlässig. Mittels des in den Kapiteln 2 und 3 diskutierten, flexiblen Grundkonzeptes war es möglich, Änderungen am experimentellen Aufbau leicht vorzunehmen. So wurde z.B. eine einfache Rekonstruktion des Primärvertex durch Koinzidenz zwischen PIN-Dioden und korrespondierenden Szintillatoren der Außenschale parallel zum laufenden Meßbetrieb in Datenaufnahme und Analyse integriert.

Im folgenden soll anhand der gewonnenen Meßdaten gezeigt werden, daß der Detektor für präzise Messungen der elastischen Proton-Proton-Streuung geeignet ist. Im einzelnen sollen Funktionsfähigkeit des Triggers, Identifizierung elastischer Ereignisse und die Erfassung der relativen Luminosität bei einer festen Energie T=790 MeV gezeigt werden. Abschliessend soll demonstriert werden, daß Messungen während der Beschleunigung des Protonenstrahls möglich sind.

4.1 Meßzyklus und Strahleigenschaften

Abb. 4.1 zeigt eine typischen Meßzyklus für Messungen bei fester Energie. Der Zyklus besteht aus Füllung des COSY-Ringes, Beschleunigung auf Sollenergie, Hineinfahren des Fadentargets in den Strahl sowie schließlich Verzögerung des (Rest)strahls und Herausfahren des Targets. Darauf schließt sich ein neuer Zyklus an. Gegen die Zeit aufgetragen ist ein dem COSY-Dipolstrom (und damit dem Strahlimpuls) proportionales Signal, ein der Targetposition proportionales Signal, das analoge Signal des Picoamperemeters (SEM), welches den Strom an aus dem Target emitierten Sekundärlektronen angibt, sowie das Signal des induktiven Strahlstrom-Meßgerätes (BCT = **B**eam **C**urrent **T**ransformer) der COSY-Leittechnik, welches ein Maß für den im COSY-Ring umlaufenden Protonenstrom ist. Das BCT-Signal ist für die verschiedenen Phasen des Zyklus starken Schwankungen unterworfen, die keine Änderung des Strahlstroms wiederspiegeln. Für die folgenden Betrachtungen ist nur des BCT-Signal in dem Zeitbereich relevant, in dem das EDDA-Target mit dem COSY-Strahl wechselwirkt.

Nach erfolgter Beschleunigung wird das Fadentarget 1.6 s nach der Injektion in den Strahl gefahren. Dann wird, erkennbar an SEM und BCT-Signal, der COSY-Strahl durch Wechselwirkung mit dem Fadentarget in guter Näherung exponentiellem Verlauf langsam reduziert. Die Zeit, die für Messungen zur Verfügung steht, ergibt sich aus Abb. 4.1 zu etwa 3 s bei einer Halbwertszeit des Strahls von etwa 0.8 s. Dies ist durch die Verwendung sehr dünner Targets und der damit verbundenen geringen Störung des umlaufenden

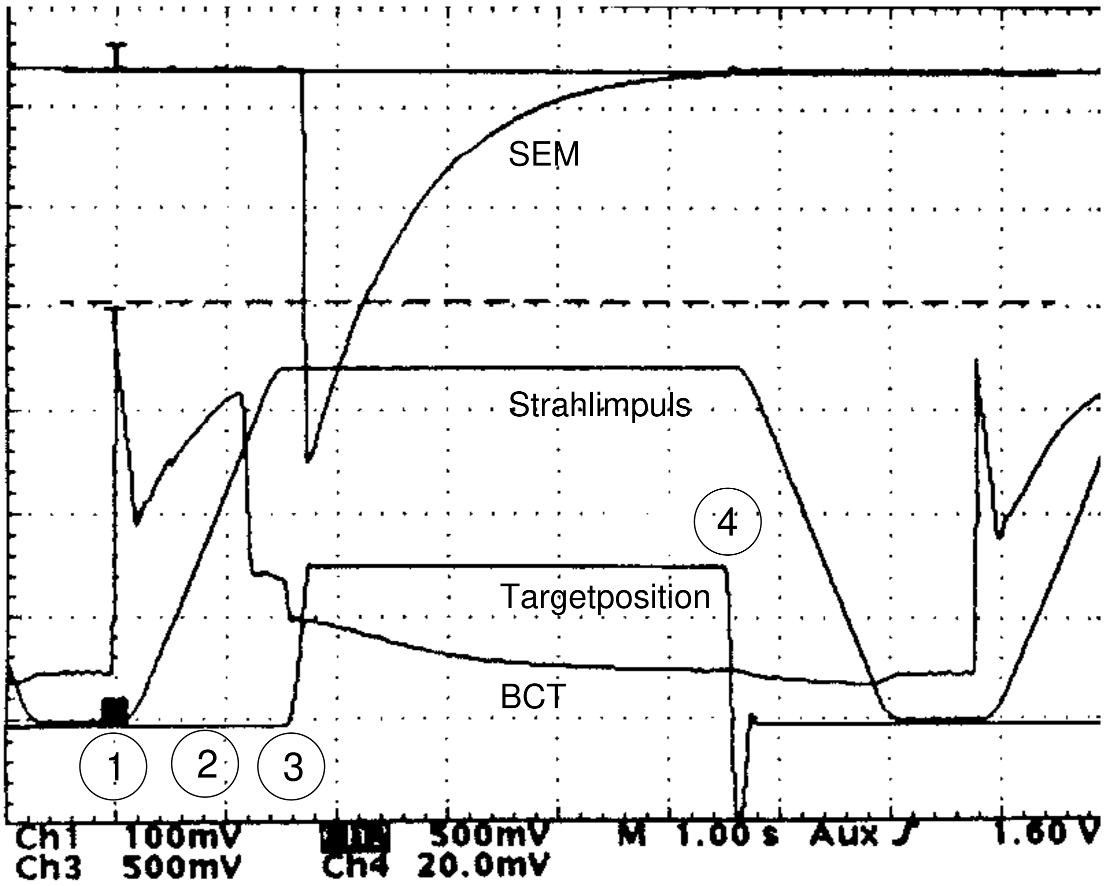


Abbildung 4.1: Typischer Meßzyklus bei fester Energie. 1: Injektion, 2: Beschleunigungsphase, 3: "Target In", 4: "Target Out"

Strahls möglich. Dieser Zyklusverlauf ist mit von Zyklus zu Zyklus geringen Abweichungen stabil reproduzierbar. Man erkennt außerdem bereits die gute Qualität des SEM-Signals als relatives Maß für die Luminosität.

Vergleichsmessungen mit Leertargets (Targethalterungen ohne eingespanntes Fadentarget) zeigen, daß die Wechselwirkung des COSY-Strahles mit dem Fadentarget und nicht mit Material der Halterung erfolgt. Durch Messungen von Einzelzählraten der Szintillator-Detektorlemente bei Einsatz des Leertargets und gleichzeitiger Variation mechanischer Strahlbegrenzer ("Scraper") im COSY-Ring konnte außerdem der Einfluß des Strahlhalos (eine Zone verminderten Strahlstroms um den eigentlichen Schwerpunkt der Strahlintensität in transversaler Richtung) fast völlig unterdrückt werden. Ein solcher Halo auch sehr geringer Intensität bewirkt durch Streuung an dem im Verhältnis zum Fadentarget extrem dicken Material der Halterung einen hohen Untergrund an Störereignissen.

Durch schnelles Durchfahren des Strahlquerschnitts mit dem Target über die Sollposition hinaus und gleichzeitiger Messung des SEM-Signals war es möglich, Strahlprofile in vertikaler Richtung aufzunehmen ([MOS94]). Typische Strahlprofile mit gaußförmigem Verlauf ergeben eine vertikale Halbwertsbreite von 5–6 mm.

Die Strahlintensität und damit die Zählrate am Experiment läßt sich bei COSY durch unterschiedliche Ringfüllungen über mehrere Größenordnungen einstellen, ohne die geometrischen Strahleigenschaften zu verändern. Dies ermöglicht Messungen bei stets nahezu optimaler Totzeit. In den meisten Fällen wurden die Strahlintensität so eingestellt, daß die Triggerraten im Bereich von einigen 100/s bis einige 1000/s lagen. Die Standzeiten der Fadentargets lagen bei allen Messungen mit sinnvoller Strahlintensität jenseits der Meßzeit insgesamt.

4.2 Zählraten und Multiplizitäten

Abb. 4.2 zeigt im oberen Bild die Zählraten der Trigger in Abhängigkeit der Zykluszeit. Dabei verblieb das Target — im Gegensatz zu Abb. 4.1 — bis über das Ende des Bereiches konstanter Energie ("flat-top") hinaus im Strahl. Bei der gewählten Strahlintensität liegen die Einzelzählraten für Stab- bzw. Ringszintillatoren im Bereich einiger 10^3 Ereignisse/s. Durch die Koinzidenzforderungen von koplanarem und kinematischem Trigger ergibt sich schließlich eine Rate der als elastisch gewerteten Ereignisse zwischen 7000 Ereignissen/s zu Beginn bzw. 800 Ereignissen/s am Ende der Phase konstanter Energie. Davon werden zwischen 20% und 60% von der Datenaufnahme digitalisiert und auf Band gespeichert. Die Sättigung der EDDA-Datenaufnahme liegt damit bei 1300 Ereignissen/s. Dies bedeutet, daß bei einer *regelmäßigen* Triggerfrequenz von 1300 Hz gerade noch 100 % aller Ereignisse registriert würden. Die Zeit, die die Datenverarbeitung zur Auslese aller Komponenten der Digitalisierungselektronik benötigt, betrug 770 μs.

Da die Triggersignale der Außenschale nicht die einzige Möglichkeit für einen Auslöser der Datennahme stellen, sondern auch die PIN-Dioden sowie die mit 400 Hz regelmässige Auslese von SEM-Signal und weiteren Zählerständen erfolgen, ergibt sich auch zum Ende eines Zyklus kein höherer Anteil registrierter Außenschalen-Ereignisse als 60%.

Da die Anzahl nicht digitalisierter Ereignisse für jedes Zeitintervall (hier bei einer Intervallbreite von 2.5 ms) vorliegt, ist eine genaue Korrektur der durch die Datenaufnahme verursachten Totzeit möglich. Wie in Abschnitt 4.8 dargestellt ist, ergibt sich kein qualitativer Unterschied zwischen Phasen hoher und niedriger Totzeit.

Die Multiplizitäten, d.h. die Anzahl getroffener Szintillatorelemente pro Ereignis in den einzelnen Detektorlagen zeigt Abb. 4.3. Signale in benachbarten Szintillatoren sind zu je einem Treffer zusammengefasst. Man erwartet für ideale, elastische Proton-Proton-Ereignisse eine Multiplizität von zwei in der Stablage, sowie je eins in den Ringhalbschalen. Andere Mehrteilchen-Endzustände wie auch elastische Ereignisse, die noch einen oder mehrere zufällig koinzidente Treffer bewirken, bilden die Ereignisse höherer Multiplizität. Diese werden durch den Trigger bewußt nicht unterdrückt, da auch die elastischen Ereignisse, die durch zufällige Koinzidenzen wie Mehrteichen-Endzustände erscheinen, registriert werden müssen. Eine genauere Untersuchung dieser Ereignisse auf Elastizität findet sich in Abschnitt 4.5.

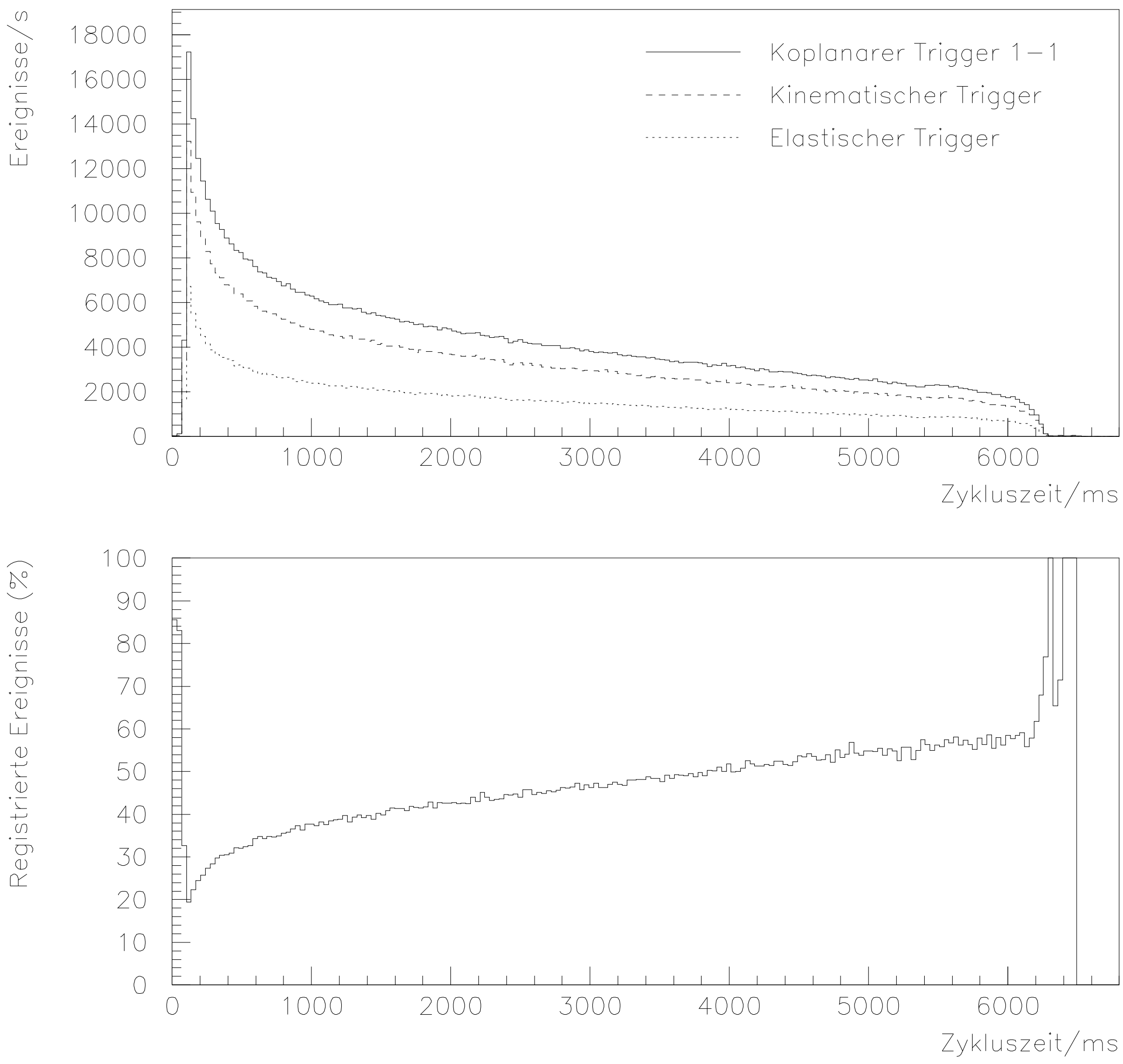


Abbildung 4.2: Zählraten und Effizienz der Datenaufnahme in Abhängigkeit der Zykluszeit. Zeitnullpunkt ist durch das Signal zum Hereinfahren des Targets in den Strahl gegeben. Oben: Raten für koplanaren und kinematischen Trigger sowie die Koinzidenz beider Trigger ("elastischer Trigger"). Das untere Bild zeigt den Anteil von der Datenaufnahme akzeptierter Ereignisse.

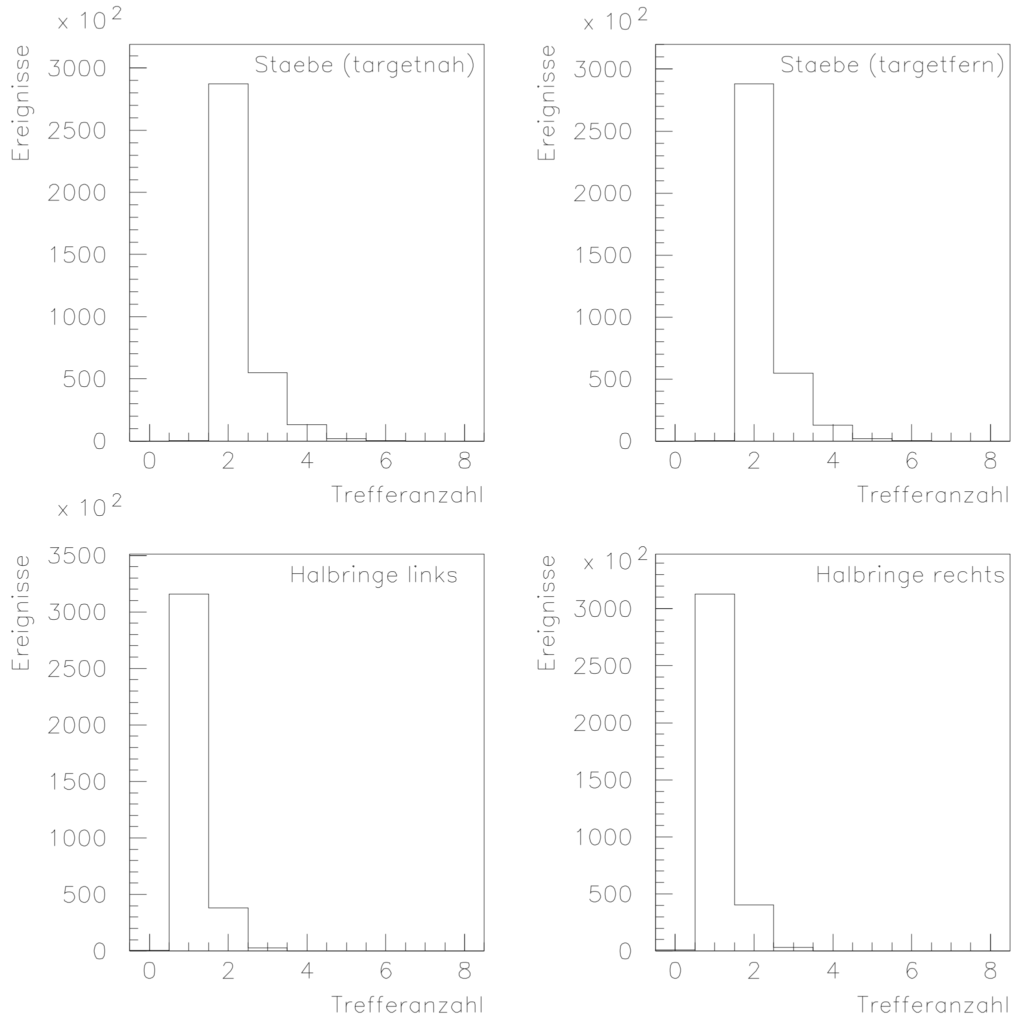


Abbildung 4.3: Multiplizitäten in Stab- und Ringlage. Signale in benachbarten Szintillatoren sind zu "Treffern" zusammengefaßt. Da die Stäbe beidseitig mit Photovervielfachern ausgelesen werden, sind die Multiplizitäten beider Seiten (targetnah/targetfern) getrennt aufgeführt. Bei den Halbringen bedeutet "links" bzw. "rechts" in Strahlrichtung gesehen.

4.3 Winkelrekonstruktion

Da die Identifizierung der elastischen Proton-Proton-Ereignisse in der Analyse über kinematische Eigenschaften geschieht, werden die Verfahren zur Winkelrekonstruktion in folgenden kurz beschrieben. Die hier angewendeten Verfahren sind in [BOL92] bzw. [ROH94] entwickelt und beschrieben.

Wie bereits gezeigt, soll der Detektor aufgrund überlappender Szintillatorquerschnitte eine über die Granularität der Szintillatorelemente hinausgehende Orts- und damit Winkelauflösung ermöglichen. Das Verhältnis der Pulshöhen in benachbarten Szintillatoren sollte proportional zur Position der Trajektorie innerhalb des Überlapp-Bereiches sein. Die mit dem Detektor registrierten Ereignisse werden nun innerhalb eines solchen Bereiches als isotrop verteilt angenommen. Trägt man nun die digitalisierten Pulshöhen der benachbarten Szintillatoren gegeneinander auf, so erwartet man eine Gerade senkrecht zur Winkelhalbierenden, entlang derer die Ereignisse gleichverteilt sein sollten. Dies gilt unter der Annahme nahezu konstanten Energieverlustes der Teilchen beim Passieren des Szintillators sowie gleicher Verstärkung beider Photomultiplier der benachbarten Elemente.

Die experimentellen Ergebnisse zeigt exemplarisch Abb. 4.4 für das Stabpaar 17/18. Aufgetragen ist für die Ereignisse, bei denen beide Stäbe ein Signal liefern, die digitalisierte Pulshöhe von Stab 18 gegen die Pulshöhe von Stab 17. Die erwartete Korrelation der Szintillatorstäbe weicht vom erwarteten geraden Verlauf ab. Offensichtlich sind große Pulshöhen unterdrückt. Ferner sind die Ereignisse entlang der Korrelationskurve nicht gleichverteilt, sondern häufen sich bei mittleren Pulshöhen. Eine Bestimmung des Azimutwinkels $\Delta\varphi$ für den Überlapp-Bereich der beiden Stäbe mittels der Rekonstruktionsformel [BOL92]

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{(1 - Q_{17,18}) \sin\varphi_0}{(1 - Q_{17,18}) \cos\varphi_0 + (1 + Q_{17,18})c} \tag{4.1}$$

mit $Q_{17,18} = (PH_{17} - PH_{18})/(PH_{17} + PH_{18})$, PH_i = digitalisierte Pulshöhe des Stabs i, $\varphi_0 = 11.25^o$, $c = R_i g_{18}/R_o g_{17}, R_i = 160mm, R_o = 166.7mm, g_i$ = elektronischer Verstärkungsfaktor von Ring i, liefert die in Abb. 4.4 rechts dargestellte Verteilung. Diese Häufung führt auch zu einer Verzerrung des rekonstruierten Winkels φ zu mittleren Winkeln des Überlappungsbereiches der Stäbe hin.

Dabei wurde vereinfacht von einem Verhältnis $g_{17}/g_{18} = 1$ ausgegangen, da die Winkelrekonstruktion vom Effekt der Nichtlinearität dominiert wird.

Eine mögliche Erklärung sind Sättigungseffekte in den Photovervielfachern. Daraufhin wurden verbesserte Spannungsteiler für die Photovervielfacher entwickelt und in der Meßperiode vom 22.8–27.8.1994 an einzelnen Szintillatorstäben getestet. Abb. 4.5 zeigt Korrelation und rekonstruierten Azimutwinkel bei Einsatz der verbesserten Spannungteiler. Zusätzlich wurde willkürlich gefordert, daß in den beiden Halbschalen des Detektors, die durch die Halbringe gegeben sind, jeweils nur ein Teilchendurchgang registriert wurde. Dies schließt zu einem hohen Teil Ereignisse aus, die nicht vom Target kommen. Die Korrelation der Pulshöhen zeigt deutlich verbesserte Linearität. Für die Rekonstruktion des Azimutwinkels (Formel 4.1) wurde ebenfalls $g_{17}/g_{18} = 1$ angenommen. Der Winkelbereich, der durch den Überlapp der Stäbe bestimmt ist, wird erwartungsgemäß deutlich homoge-

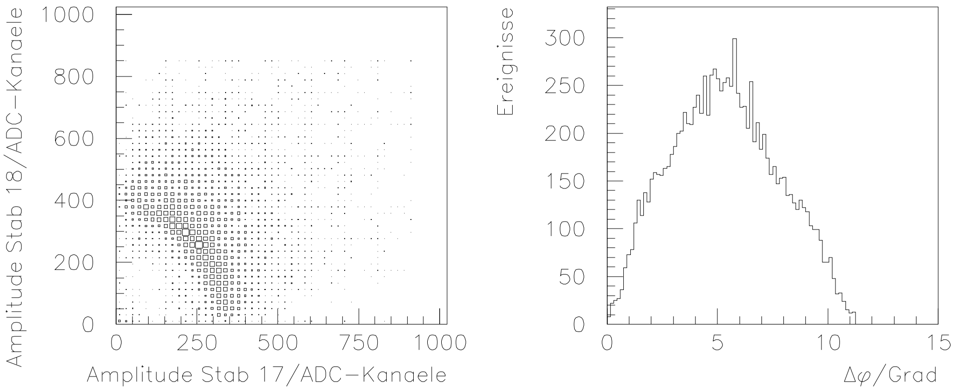


Abbildung 4.4: Korrelation der Pulshöhen von Stab 17 und Stab 18 sowie der daraus rekonstruierte Azimutwinkel für den Überlapp-Bereich diese beiden Stäbe. Stab 17 und 18 mit herkömmlichen Spannungsteilern.

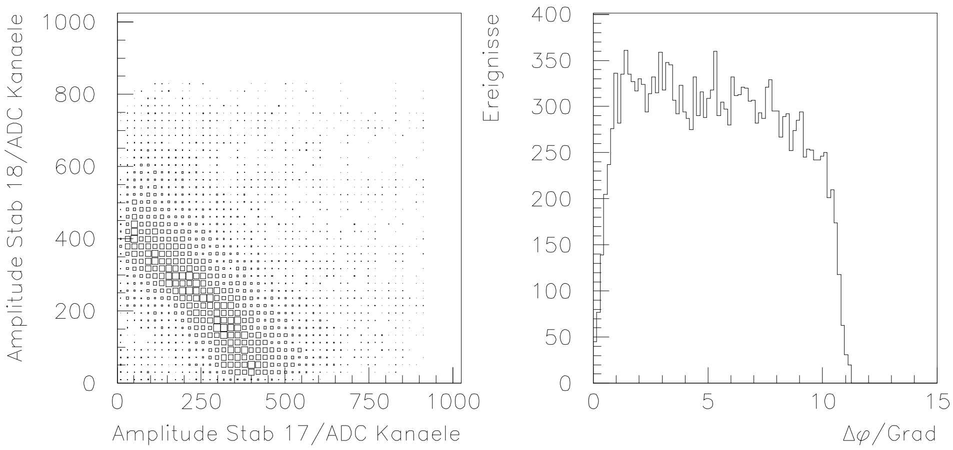


Abbildung 4.5: Korrelation der Pulshöhen von Stab 17 und Stab 18 sowie der daraus rekonstruierte Azimutwinkel für den Überlapp-Bereich dieser beiden Stäbe. Stab 17 und 18 mit verbesserten Spannungsteilern.

ner rekonstruiert. Durch weitere Untersuchung zur Bestimmung des Verstärkungsabgleichs (g_{17}/g_{18}) sind zusätzliche Verbesserungen möglich. Für künftige Messungen kommen daher die verbesserten Spannungsteiler zum Einsatz. Die in in diesem Kapitel vorgestellten Messungen sind jedoch mit Spannungsteilern wie in Abb. 4.4 vorgenommen worden, so daß alle rekonstruierten Azimutwinkel innerhalb eines Überlapp-Bereiches zweier benachbarter Stäbe entsprechend verzerrt sind. Für die hier diskutierten Ergebnisse ist die Verzerrung jedoch nicht von Bedeutung.

Die experimentelle Korrelation benachbarter Halbringe ist exemplarisch in Abb. 4.6 dargestellt. Analog zu Abb. 4.4 sind für die Ereignisse, bei denen Halbring 21 und 22 ein Signal liefern, die digitalisierten Pulshöhen der beiden Halbringe gegeneinander aufgetragen.

Aufgrund der speziell gewählten Geometrie für die Halbringe ist es gewährleistet, daß ein vom Target kommendes Ejektil meistens zwei, unter speziellen Winkeln jedoch drei benachbarte Halbringe durchquert [WOL92]. Daher zeigt die Pulshöhenkorrelation bei hohen Amplituden eine Abweichung vom linearen Verlauf bei mittleren Amplituden, da für die korrespondierenden Flugstrecken zusätzlich Energie in in den Halbringen 20 bzw. 23 verloren wird.

Während sich die Form der Korrelation mit den Erwartungen deckt, findet sich jedoch entlang der Korrelationsgeraden keine Gleichverteilung der Ereignisse, sondern eine scheinbare Häufung bei hohen Amplituden in Halbring 22. Eine entsprechende Häufung in der Korrelation zwischen Ring 22 und 23 (nicht dargestellt) läßt sich jedoch nicht feststellen, so daß diese Häufung nicht auf vermehrten Teilchendurchgang zurückzuführen ist.

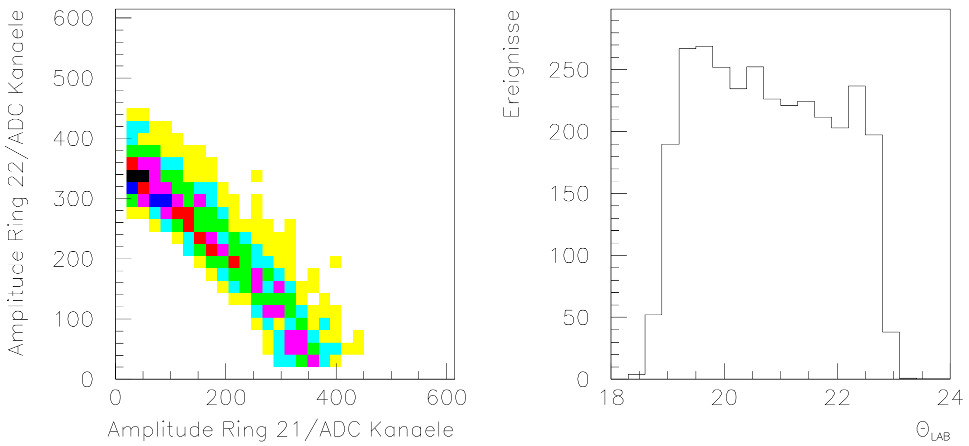


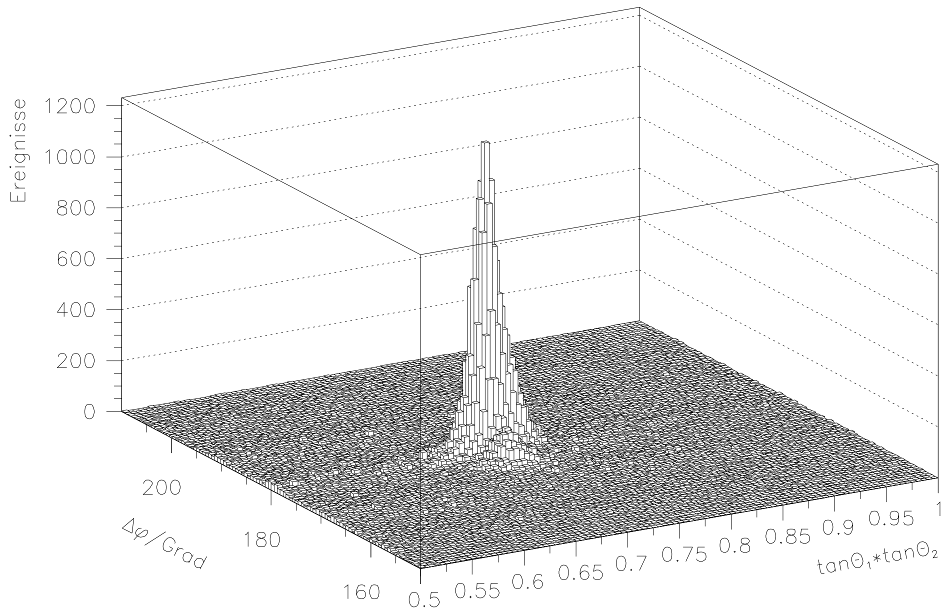
Abbildung 4.6: Korrelation der Pulshöhen von Halbring 21 und Ring 22 (links) sowie der daraus rekonstruierte Polarwinkel θ_{lab} für den Überlapp-Bereich dieser beiden Stäbe (rechts). Dabei wurde zusätzlich verlangt, daß es sich um elastische Ereignisse handelt.

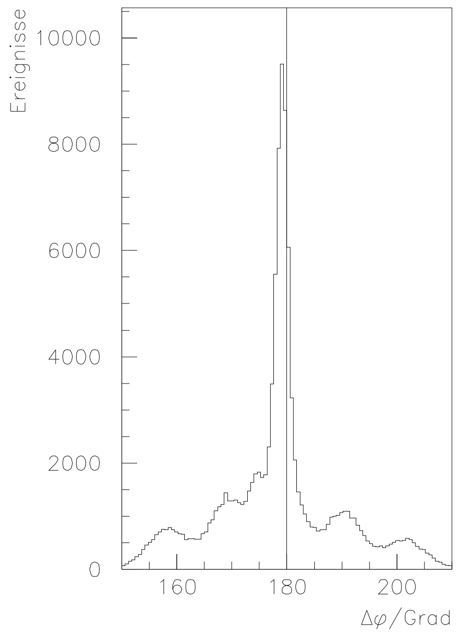
Eine genauere Untersuchung [ROH94] zeigt, daß der Lichttransport in den Halbringen in Abhängigkeit von Azimutwinkel (nahe bzw. fern vom Lichtleiter) sowie des Einschußortes (nahe am Innenradius/nahe am Außenradius des Halbrings) starken Einfluß auf die gemessene Pulshöhe hat und alle Verteilungen wie in Abb. 4.4 verzerrt. Es ist daher nötig, die gemessene Pulshöhe für jeden Halbring je nach Azimutwinkel und (zunächst scheinbarem) Polarwinkel zu korrigieren. Nach erfolgter Korrektur läßt sich eine Polarwinkelverteilung wie in [ROH94] ermitteln. Der rekonstruierte Polarwinkelbereich für die Halbringe 21 und 22 ist ebenfalls in Abb. 4.4 dagestellt. Dabei wurde zusätzlich verlangt, daß es sich um elastisch getreute Protonen handelt.

Die ersten neun Halbringe in Targetnähe sind aus fertigungstechnischen Gründen aus einzelnen szintillierenden Fasern zusammengesetzt. Bei diesen ist das Verfahren der überlappenden Szintillatorquerschnitte aus geometrischen Gründen nicht mehr anwendbar. Eine Verbesserung der Ortsauflösung kann stattdessen durch Feststellen der einzelnen Treffer der szintillierenden Fasern erreicht werden. Dazu bedient man sich sog. "latching discriminators" (s. 2.2), eine spezielle Art von Vielkanal-Diskriminatoren, die ein Treffermuster bis zum Eintreffen eines logischen Signals (Trigger der Außenschale) akkumulieren und zur Auslese über CAMAC bereitstellen. Dieses Verfahren wurde in der Meßperiode vom 13.6. – 18.6.1994 exemplarisch für vier Halbringe (16 Fasern) erprobt und erwies sich bei den gewählten Strahlintensitäten und damit verbundenen relativ geringen zufälligen Koinzidenzen als geeignet. Für die folgenden Ergebnisse aus der Meßperiode vom 13.6.–18.6.1994 ist die Winkelauflösung für den Bereich der aus szintillierenden Fasern gefertigten Halbringe auf $\Delta\theta_{lab} = 2^o - 3^o \hat{=} \Delta\theta_{CM} = 3^o - 4^o$ beschränkt. Für den übrigen Winkelbereich beträgt die Auflösung $\Delta\theta_{lab} = 0.5^o - 1.^o \hat{=} \Delta\theta_{CM} = 1^o - 2^o$.

4.4 Identifikation elastischer Ereignisse

Für das Erkennen elastischer Proton-Proton-Ereignisse sind wie schon in der Implementation des Triggers Koplanarität mit der Strahlachse sowie kinematische Korrelation gemäß Formel 2.1 relevant. Mit bereits beschriebenen Winkelrekonstruktion läßt sich (mit obigen Einschränkungen) Azimutwinkel φ und Polarwinkel θ der Ejektile genauer bestimmen. Trägt man nun für jedes Zwei-Teilchen-Ereignis die aus den Winkeln bestimmte Azimutwinkeldifferenz $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$ sowie den Wert $\tan\theta_1 \tan\theta_2$ unter der Annahme, daß es sich um elastisch gestreute Protonen handelt gegeneinander auf, so erhält man für das CH_2-Fadentarget das in Abb. 4.7 dargestellte Ergebnis. Zur Verdeutlichung des Untergrundereignisse wurde ein relativ "offener" kinematischer Trigger gewählt, der nur eine grobe Korrelation zwischen Vorwärts- und Rückwärtswinkelringen verlangt (mindestens ein Rückwärtswinkel-ring mit einem koinzidenten Vorwärtwinkel-ring). Da die elastische Proton-Proton-Streuung im betrachteten Energiebereich einen dominierenden Beitrag liefert, erkennt man die Häufung elastischer Ereignisse bei $\Delta\varphi = 180^o$ sowie $\tan\theta_1 \tan\theta_2 = 1/\gamma = 0.702$ für den Strahlimpuls $p = 1455 MeV$. Dabei sind nur Ereignisse berücksichtigt, die die geforderte ideale Multiplizität von zwei Treffern in der Stablage sowie je einem Treffer in den Halbringlagen erfüllen. Eine Diskussion der Ereignisse





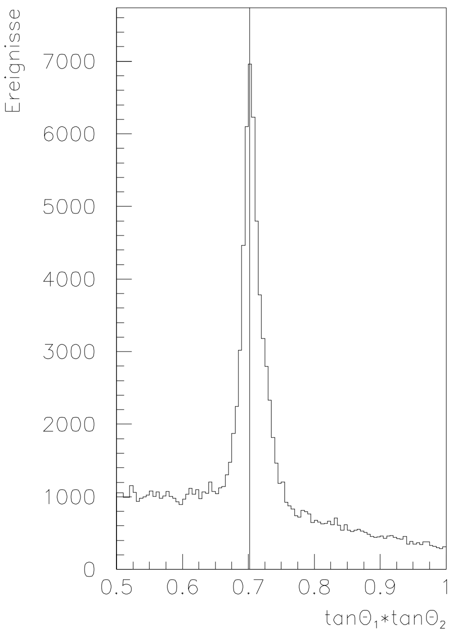


Abbildung 4.7: Verteilung der 2-Teilchen-Ereignisse in der $(\tan\theta_1 \tan\theta_2) - \Delta\varphi$-Ebene für ein CH_2-Target (oben), sowie die Achsenprojektionen (unten). Markiert ist $\tan\theta_1 \tan\theta_2 = 1/\gamma^2 = 0.702$ sowie $\Delta\varphi = 180^o$ für die elastische Proton-Proton-Streuung bei T = 793 MeV. Die periodische Untergrundstruktur in der $\Delta\varphi$-Projektion ist auf Nichtlinearitäten der Stab-Photomultiplier zurückzuführen

höherer Multiplizität findet sich in Abschnitt 4.5. In der Projektion auf die $\Delta\varphi$-Achse ist eine deutliche, periodische Struktur zu erkennen. Sie rührt von den in Abschnitt 4.3 diskutierten Nichtlinearitäten der Stab-Photomultiplier her. Position und Auflösung in der $\Delta\varphi$-Rekonstruktion sind aufgrund dieses Effektes verzerrt. Für die folgenden Untersuchungen wird zur Selektion elastischer Ereignisse daher ein relativer großer Bereich in $\Delta\varphi$ um 180^o gewählt (s. 4.5). Für künftige Messungen sollte aufgrund der verbesserten Spannungsteiler (s. Abschnitt 4.3 eine deutlich verbesserte $\Delta\varphi$-Rekonstruktion möglich sein.

In der Projektion auf die $\tan\theta_1 \tan\theta_2$)-Achse erkennt man, daß sich die elastischen Ereignisse von einem relativ flach verlaufenden Untergrund abheben. Durch Auswahl von Ereignissen innerhalb dieses Häufungsbereiches ist es möglich, die elastischen Ereignisse zu selektieren. Da das verwendete Targetmaterial Polypropylen zusätzlich eine hohe Anzahl von Kohlenstoff-Streuzentren enthält, sowie die Aluminium-Bedampfung des Fadens auch Streuung an Aluminium-Kernen ermöglicht, wurde dieser Effekt mit einem Aluminium-bedampften Kohlenstoff-Faden separat untersucht.

Abb. 4.8 zeigt die mit einem Al-bedampften Kohlenstoff-Target gewonnen Ereignisse in gleicher Darstellung. Die Streuung am Kohlenstoff und/oder Aluminium zeigt einen kinematisch breiten Untergrund, der sich sich im Häufungsbereich der elastischen Proton-Streuung am Wasserstoff (Abb.4.7) gut interpolieren und damit quantitativ abziehen läßt. Eine Anwendung findet sich in der in [ROH94a] dargestellten Winkelverteilung elastischer Ereignisse. Für die folgende Diskussion der Trigger ist der quantitative Abzug des Kohlenstoff-Untergrundes nicht relevant, so daß im folgenden ein "elastisches Ereignis" immer dadurch gekennzeichnet ist, daß es im Häufungsbereich der elastischen Streuung in Abb. 4.7 liegt.

4.5 Ereignisse höherer Multiplizität

Abb. 4.7 stellt die Verteilung "perfekter" 2-Teilchen-Ereignisse dar. Diese sind dadurch gekennzeichnet, daß sie exakt zwei Treffer in der Stablage sowie je einen Treffer in der Ringlage liefern. Zusätzlich wird gefordert, daß die Treffer in der Stablage in verschiedenen Halbschalen des Detektors — definiert durch die zwei Lagen der Szintillator-Halbringe — auftreten. Diese bilden den Großteil der registrierten Ereignisse. Es ist jedoch möglich, daß ein elastisches Ereignis durch ein zufällig koinzidentes Signal in irgendeinem weiteren Szintillatorelement verfälscht wird. Dabei kann es sich bei dem zusätzlichen Treffer sowohl um durch echten Durchgang ionisierender Teilchen als auch durch Rauschen oder Einstreuung verursachte, unechte Signale handeln. Um auch aus diesen Ereignissen die echt elastischen zu selektieren, werden alle Kombinationen der Treffer in den Szintillatoren auf ihre Elastizität geprüft.

Dazu bildet man aus den Treffern alle Kombinationen, die die Multiplizitätsforderungen für ein "perfektes" Zwei-Teilchen-Ereignis (s.o.) erfüllen. Diese Kombinationen zeigen die Charakteristika der elastischen Streuung unterschiedlich gut. Ein Kriterium dabei ist der Abstand des angenommenen Ereignisses in der $\Delta\varphi - (\tan\theta_1 \tan\theta_2)$-Ebene vom Punkt, der durch die elastischen Proton-Proton-Streuung gegeben ist ($\Delta\varphi = 180^o$, $\tan\theta_1 \tan\theta_2 =$

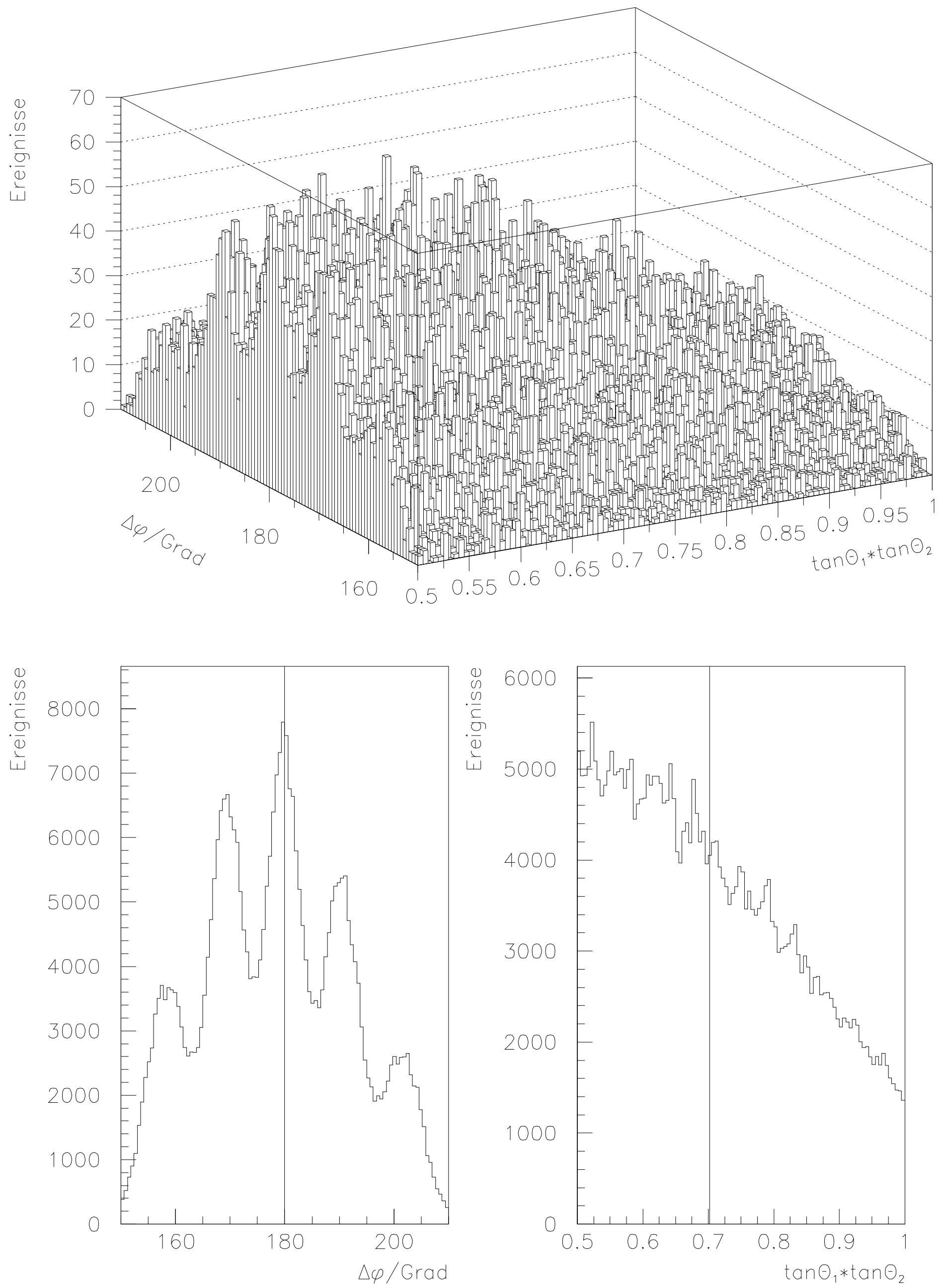


Abbildung 4.8: Verteilung der 2-Teilchen-Ereignisse in der $(\tan\theta_1 \tan\theta_2) - \Delta\varphi$-Ebene gemessen mit einem ^{12}C-Target (oben), sowie die Projektion auf die Achsen (unten). Die periodische Struktur in der $\Delta\varphi$-Projektion ist auf Nichtlinearitäten der Stab-Photomultiplier zurückzuführen

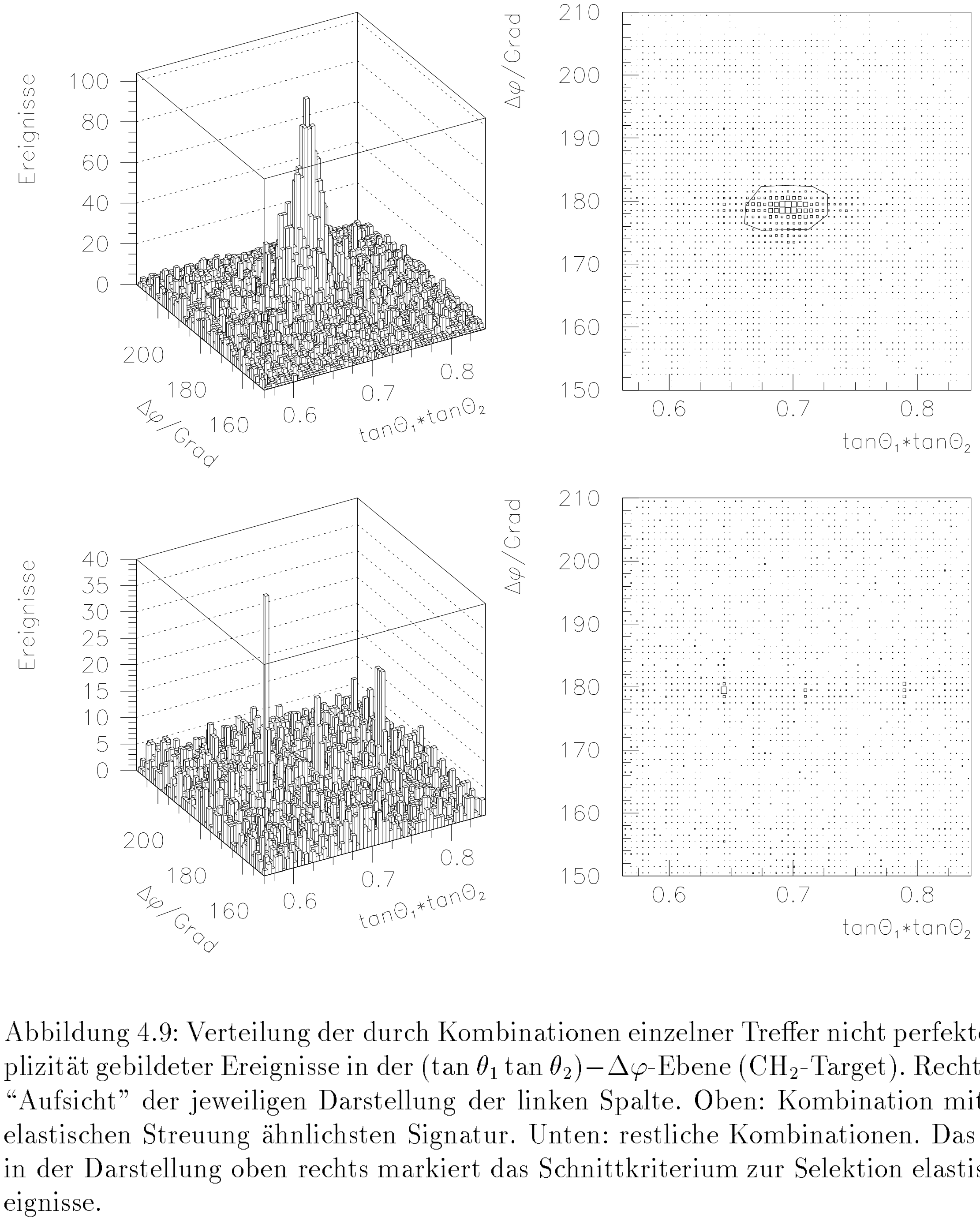


Abbildung 4.9: Verteilung der durch Kombinationen einzelner Treffer nicht perfekter Multiplizität gebildeter Ereignisse in der $(\tan\theta_1 \tan\theta_2) - \Delta\varphi$-Ebene ($CH_2$-Target). Rechte Spalte: "Aufsicht" der jeweiligen Darstellung der linken Spalte. Oben: Kombination mit der der elastischen Streuung ähnlichsten Signatur. Unten: restliche Kombinationen. Das Polygon in der Darstellung oben rechts markiert das Schnittkriterium zur Selektion elastischer Ereignisse.

$1/\gamma^2 = 0.702$. Sortiert man die Trefferkombinationen nach diesem Abstand, so erhält man Verteilungen wie in Abb. 4.9 dargestellt. Die obere Verteilung stellt die Kombinationen mit geringstem Abstand, die untere Verteilung alle übrigen Kombinationen dar.

Man erkennt für die Kombinationen mit geringstem Abstand eine deutliche Häufung von Ereignissen beim Punkt der elastischen Streuung. Diese stellen offensichtlich elastische Proton-Proton-Ereignisse dar, die durch einen oder mehrere zusätzliche Treffer verfälscht werden. Sie sind deutlich vom Untergrund trennbar und können so zusätzlich zu den perfekten elastischen Ereignissen selektiert werden. Das Polygon markiert das verwendete Schnittkriterium. Alle Ereignisse innerhalb des Polygons werden als elastisch gewertet. Ihr Anteil liegt damit bei etwa 10 % der elastischen Ereignisse.

Die Verteilungen der übrigen Ereignisse zeigen sich als bis auf einzelne Häufungspunkte strukturlos. Diese Häufungen entsprechen Einzeltreffern in bestimmten Halbringen. Solche Einzeltreffer sind durch Einstreuung, Rauschen oder Durchgang eines ionisierenden Teilchens, welches nicht vom Target kommt, zu erklären. Tritt ein solcher Einzeltreffer zusammen mit einem elastischen Ereignis auf, so führt dies zu einem Eintrag in der unteren Verteilung in Abb. 4.9.

4.6 Trigger

Für die Bewertung des Triggers gibt es im wesentlichen zwei Kriterien:

1. Der Trigger soll alle elastischen Proton-Proton-Ereignisse erkennen. Die *Triggerakzeptanz* (Anzahl der vom Trigger akzeptierten elastischen Ereignisse / Gesamtzahl elastischer Ereignisse) soll möglichst hoch, im Idealfall = 1 sein. Da hierbei im wesentlichen geometrische Aspekte sowie Energieverluste und Nachweiswahrscheinlichkeiten eine Rolle spielen, wurde beim Entwurf des Triggers versucht, dies weitgehend durch Simulationsrechnungen sicherzustellen. Im folgenden soll anhand der experimentellen Daten gezeigt werden, daß es keine Hinweise für nicht erkannte elastische Ereignisse gibt.

2. Der Trigger soll eine möglichst große Zahl von Untergrundereignissen verwerfen. Die *Triggerselektivität* (Anzahl der durch die Analyse als elastisch identifizierten Ereignisse / Anzahl der vom Trigger akzeptierten Ereignisse) soll möglichst hoch sein. Da der Untergrund von einer Vielzahl experimenteller Faktoren abhängt, ist er durch Simulationsrechnungen nur schwer erfaßbar. Anhand der Daten soll im folgenden die Triggerselektivität ermittelt werden

Die Forderung hoher Triggerakzeptanz bei weitem die wichtigere, da vom Trigger verworfene elastische Ereignisse nicht korrigiert werden können. Abstriche bei der Triggerselektivität lassen sich jedoch stets durch höhere Meßzeit ausgleichen. Vom Trigger können prinzipiell nur solche Ereignisse akzeptiert oder verworfen werden, bei denen mindestens zwei Ejektile Stab- und Ringlage erreichen. Sowohl koplanarer als auch kinematischer Trigger sind so konzipiert, daß auch Ereignisse höherer Multiplizität (z.B. 3 Treffer in Stab- und

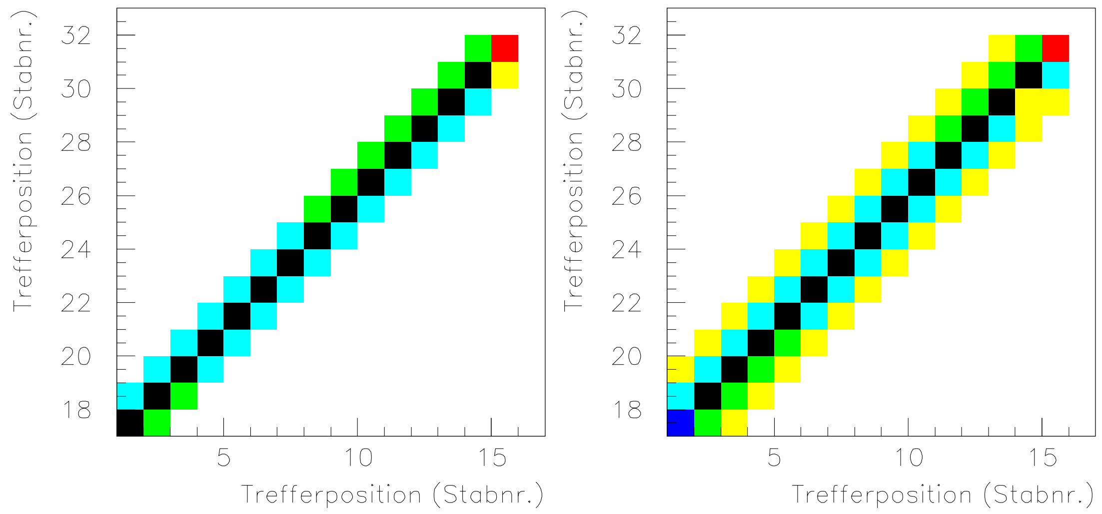


Abbildung 4.10: Korrelation der Treffer in den Szintillatorstäben für den koplanaren "1-1"-Trigger (links) bzw. "1-3"-Trigger (rechts)

Ringlage) als elastisch gelten, falls irgendeine Kombination der Treffer die Triggerkriterien erfüllt. Dies stellt sicher, daß keine echt elastischen Ereignisse durch zufällige Koinzidenzen unterdrückt werden.

Die Funktion des koplanaren "1-1" bzw. "1-3" Triggers zeigt Abb. 4.10. Dabei wurde für Ereignisse mit genau zwei registrierten Treffern in der Außenschale die Position der beiden Treffer in der Stablage (in Einheiten der Stabnummern) gegeneinander aufgetragen. Treffer in benachbarte Stäben werden als das Mittel der beteiligten Stabnummern eingetragen (z.B. Signale in Stab 14 und 15 $\hat{=}$ 14.5.). In der linken Darstellung finden sich die Stabkorrelationen für den koplanaren Trigger "1-1", rechts für den koplanaren Trigger "1-3". Zu Erkennen ist die Häufung direkt gegenüberliegender Treffer für die gesamte Stablage sowie die Einschränkung der als koplanar gewerteten Stäbe durch den Trigger "1-1" im Gegensatz zum Trigger "1-3".

Für den koplanaren Trigger bedeutet die Forderung nach hoher Akzeptanz, mit der Strahlachse koplanare Ereignisse auch als koplanar zu erkennen, wenn sie durch Versatz des Primärvertex oder Streuung in Strahlrohr oder Szintillatormaterial (später z.B. Innenschale aus szintillierenden Fasern) einen Winkel $\Delta\varphi \neq 180^o$ vortäuschen. Simulationsrechnungen ([GRO93]) legen nahe, daß koplanarer "1-1"- und "1-3"- Trigger für real mögliche Primärvertexverschiebungen gleiche Akzeptanzen liefern sollten. Bei der gewählten Geometrie sollte der "1-1"-Trigger Ereignisse bis zu einer Abweichung von 3 cm, der "1-3"-Trigger Ereignisse bis zu einer Abweichung von 6 cm vom Sollvertex als koplanar erkennen können. Bei einer Länge des Fadentargets von 3 cm ($\hat{=}\pm$ 1.5 cm Abweichung vom Primärvertex) sollte daher auch der koplanare 1-1-Trigger alle echt koplanaren Ereignissen vom Target erkennen.

Zur Überprüfung dieser Aussage wurden Ereignisse, die mit koplanarem 1-3 Trigger aufgenommen wurden, in der Analyse nochmals dem Kriterium des “1-1”-Triggers unterworfen. Dabei wurde die in der elektronischen Realisierung des Triggers vohandene Diskriminatorschwelle von 50 mV durch eine Schwelle von 75 ADC-Kanälen nachgeahmt (Eine Kalibrierungsmessung ergab einen linearen Zusammenhang von 1.5 ADC-Kanälen / mV Diskriminatorschwelle). Das Ergebnis ist in Abb. 4.11 dargestellt. Es zeigt sich, daß alle Ereignisse, die im Häufungsbereich der elastischen Streuung liegen, auch vom Kriterium des “1-1”-Triggers akzeptiert werden. Zusätzlich zeigen die vom “1-1”-Trigger verworfenen Ereignisse keine Häufung in ihrer ($\tan\theta_1 \tan\theta_2$) Verteilung, die auf elastisch gestreute Protonen hindeutet.

Dies legt nahe, bei Messungen mit dem Fadentarget den restriktiveren “1-1”-Trigger zu verwenden. Für die Messungen in der zweiten Experimentierphase mit dem Atomstrahltarget mit deutlich ungünstigerer Geometrie steht der “1-3”-Trigger weiterhin zur Verfügung.

Abb. 4.12 zeigt die Wirkung des kinematischen Triggers. Dargestellt ist für alle rekonstruierten 2-Teilchen-Ereignisse $\tan\theta_1$ gegen $\tan\theta_2$ der aus den Treffern in den Halbringen rekonstruierten Polarwinkel θ_1 und θ_2. Dabei wurde die Einstellung des kinematischen Triggers variiert. Die Akzeptanz des kinematischen Triggers ist wesentlich durch den Energiebereich der verwendeten kinematischen Vorhersage gegeben (s. Abschnitt 2.3). So läßt z.B. eine kinematische Vorhersage für den Energiebereich 790–800 MeV nur Koinzidenzen zu, die entsprechend Formel 2.1 mit $T \in [790, 800]$ korreliert sind. Eine kinematische Vorhersage für den Bereich 500–2500 MeV akzeptiert entsprechend alle Koinzidenzen gemäß Formel 2.1 mit $T \in [500, 2500]$ MeV. Das bedeutet, daß bei größeren Energiebereichen für die kinematische Vorhersage auch Halbringkoinzidenzen zugelassen werden, die bei der jeweiligen Energie durch elastisch gestreute Protonen nicht erreicht werden. Man erwartet dann einen höheren Anteil an nicht elastischen Ereignissen, die vom Trigger akzeptiert werden.

Während für die oberste Verteilung lediglich der koplanare “1-3”-Trigger verwendet wurde, repräsentieren die übrigen Verteilungen zusätzlich kinematische Trigger mit einer Vorhersagetabelle von 500–2500 MeV bzw. 790–800 MeV. Offensichtlich liegen alle elastischen Ereignisse auf der Korrelationskurve, die durch die Formel 2.1 für die Energie $T = 793$ MeV gegeben ist. Auch bei der “engsten” Triggereinstellung (790–800 MeV) liegen alle elastischen Ereignisse innerhalb der Triggerakzeptanz. Bei allen dargestellten Verteilungen ist durch die Einschränkung auf die perfekte Multiplizität eines 2-Teilchen-Ereignisses schon eine Selektion der Daten gegeben, so daß die Häufung der Ereignisse auch für “offenere” Trigger prominent erscheint.

Tabelle 4.1 zeigt die Verhältnisse von elastischen und inelastischen Ereignissen für die verschiedenen Triggerkombinationen. Dabei bedeutet “$<$ 2-Prong”, daß Treffer in den Szintillatoren zur Bildung mindestens eines “perfekten” 2-Teilchen-Ereignisses fehlen. Das ist dann der Fall, wenn in mindestens einem Szintillator ein Signal mit geringer Pulshöhe zum Auslösen des Triggers genügt hat, das Signal aber nicht zur Konvertierung in einen ADC-Wert über der jeweils eingestellten Schwelle der FERA-ADCs (“Pedestal”) geführt hat.

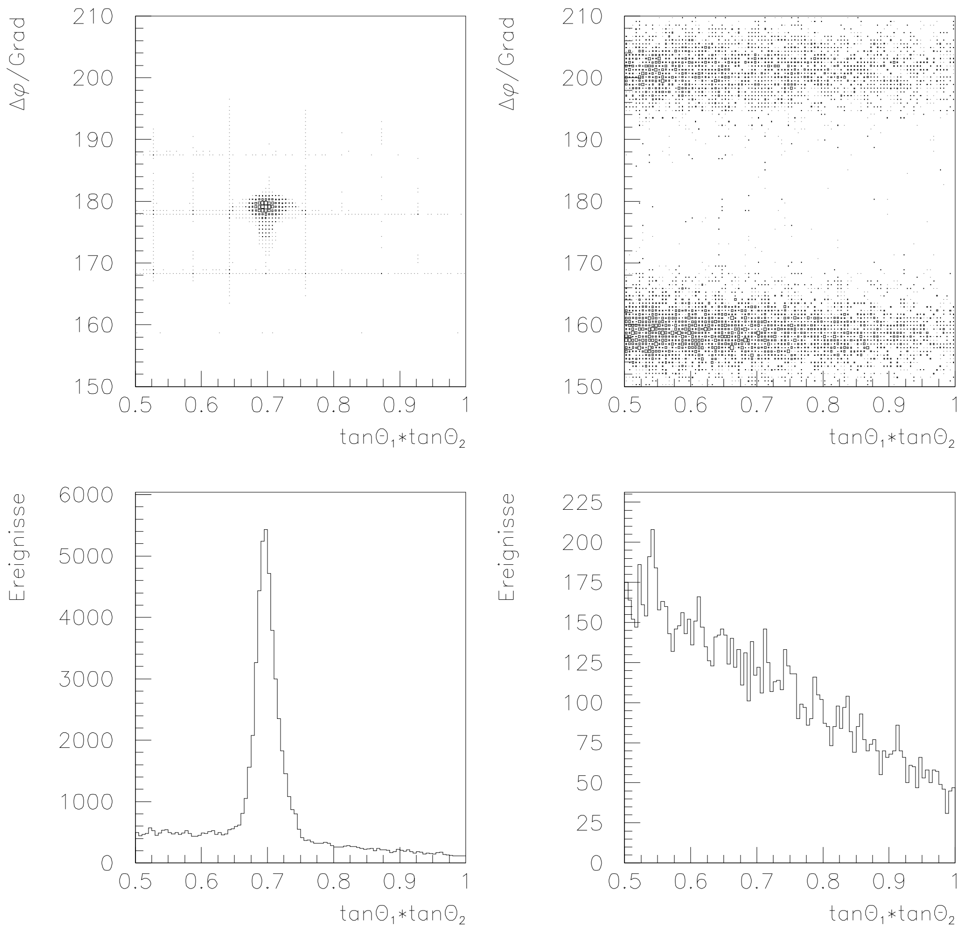


Abbildung 4.11: Verteilung der mit koplanarem Trigger "1-3" aufgenommenen 2-Teilchen-Ereignisse in der $\Delta\varphi$-($\tan\theta_1 \tan\theta_2$) Ebene (oben), sowie die ihre Projektion auf die $\tan\theta_1 \tan\theta_2$-Achse . Links: Ereignisse, die auch das Kriterium des koplanaren "1-1"-Triggers erfüllen. Rechts: Ereignisse, die vom koplanaren Trigger "1-1" verworfen würden.

Typischerweise geschieht dies für die aus szintillierenden Fasern gebildeten Halbringe, die vergleichsweise kleine Signale liefern. Die Spalte "= 2-Prong" enthält die Ereignisse mit der oben diskutierten, perfekten Multiplizität. Die Spalte "> 2-Prong" zeigt die Ergebnisse für alle Ereignisse, die durch zusätzliche Treffer von der idealen Multiplizität abweichen (vgl. Abschnitt 4.5). Die Selektion elastischer Ereignisse geschieht durch den zweidimensionalen Schnitt wie in Abb. 4.9 dargestellt.

Die kinematischen Triggervarianten werden durch den Energiebereich ihrer kinematischen Vorhersagetabelle klassifiziert (vgl. Abschnitt 2.3. So bedeutet "500–2500 MeV" eine Vorhersagetabelle für den kinetischen Energiebereich von 500–2500 MeV. Dabei ist

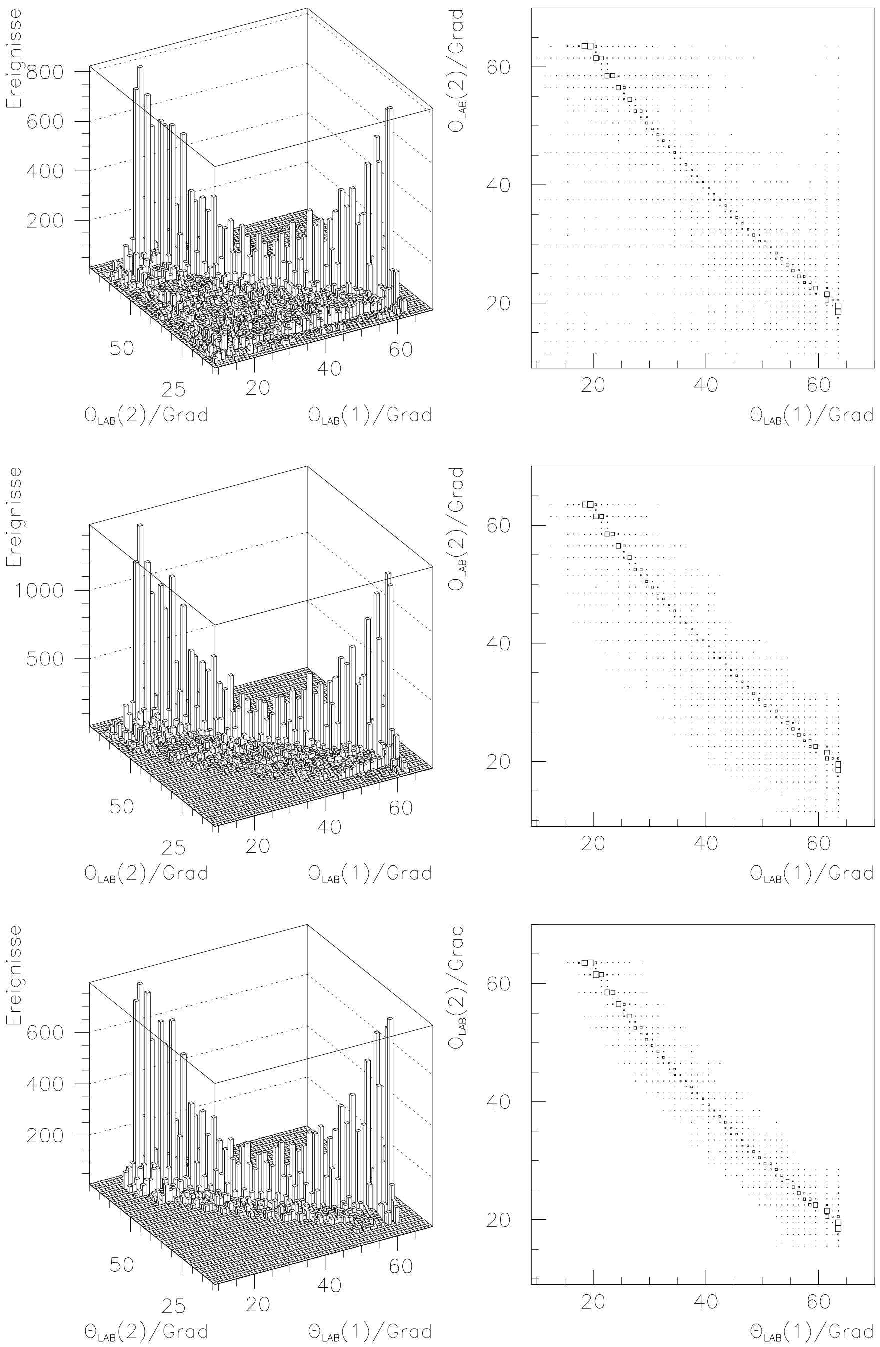


Abbildung 4.12: Verteilung der rekonstruierten Polarwinkel $\theta_{1,2}$ für 2-Teilchen-Ereignisse bei verschiedenen Triggerarten. Oben: nur koplanarer Trigger “1-3”; Mitte: koplanarer Trigger “1-3” und kinematischer Trigger “500–2500”; Unten: koplanarer Trigger “1-3” und kinematischer Trigger “790–800’ (s. Text)

Trigger		< 2 Prong	= 2 Prong		> 2 Prong		Summe	
koplanar	kinematisch	inelast.	elast.	inelast.	elast.	inelast.	elast.	inelast.
1-3	-	35.5	8.9	32.8	0.7	22.1	9.6	90.4
1-3	500–2500	2.3	19.4	45.9	1.4	30.9	20.9	79.1
1-3	790–800	2.3	25.3	41.3	1.9	29.3	27.2	72.8
1-1	500–2500	2.1	23.3	45.1	1.7	27.7	25.0	74.9

Tabelle 4.1: Anteil elastischer und inelastischer Ereignisse an den Ereignissen unterschiedlicher Multiplizität. Alle Angaben in Prozent der registrierten Ereignisse.

erkennbar, daß die Wahl des Energieintervalls für die kinematische Vorhersage offensichtlich unkritisch ist. Auch für die Vorhersage, die den gesamten COSY-Energiehub überstreicht, werden über 25 % aller registrierten Ereignisse durch die Analyse als elastisch identifiziert. Eine Kombination von koplanarem Trigger "1-1" mit kinematischem Trigger "790–800" wurde unter vergleichbaren Experimentbedingungen aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

4.7 Luminosität und Normierung

Die Erfassung der Signale zur relativen Luminositätsbestimmung zeigt exemplarisch für Messungen bei T=793 MeV Abb. 4.13. Dargestellt sind in Abhängigkeit der Zykluszeit nach "Target in" das über viele Zyklen gemittelte SEM-Signal sowie die Anzahl der diskriminierten Pulse zweier PIN-Dioden, die unter $\varphi = 90^o$ bzw. $\varphi = 270^o$ auf dem Strahlrohr montiert waren. Man erkennt das gute Signal-zu-Rauschverhältnis der gemittelten Luminositätssignale, welches den Vorteil der "multi-pass-technique" demonstriert. Die Zeitauflösung ist wiederum durch die Auslesefrequenz des Vielkanal-Zählermoduls (400 Hz $\hat{=}$ 2.5 ms) gegeben.

Für den Fall, daß SEM-Signal und Zählrate in den PIN-Dioden gute Luminositätssignale sind, muß der Quotient von Triggerrate der Außenschale und dem jeweiligen Signal bei fester Energie konstant sein, da nur die Strahldichte am Targetort abnimmt. Dividiert man jeweils Triggerrate durch SEM-Signal bzw. PIN-Dioden-Signal, so ergibt sich das in Abb. 4.14 dargestellte Ergebnis. Erkennbar ist, daß das aus der Summe der Einzelzählraten der PIN-Dioden gebildete Normierungsignal bis auf den Beginn des Zyklus (Targetbewegung) ein offensichtlich gutes Normierungssignal darstellt. Die Normierung mittels SEM-Signal liefert jedoch ein deutlich längeres "Einschwingverhalten", sowie einen leichten Anstieg des Verhältnisses "Triggerrate zu SEM" über die gesamte Zyklusdauer.

Für die Normierung bei Messungen während der Beschleunigung des Protonenstrahls gibt es noch eine Vielzahl von zusätzlichen Effekten zu berücksichtigen. So ist die Sekundärelektronenausbeute im Fadentarget in erster Linie von der dort deponierten Energie, die wiederum mit der Energie der Strahlprotonen variiert, abhängig [STE57]. Ferner wird das SEM-Signal stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Fadens am Ort der Strahlwechselwirkung beeinflußt. Da der Strahl während der Beschleunigung in Breite und Lage schwanken kann, kann die Sekundärelektronenausbeute Schwankungen unterworfen sein,

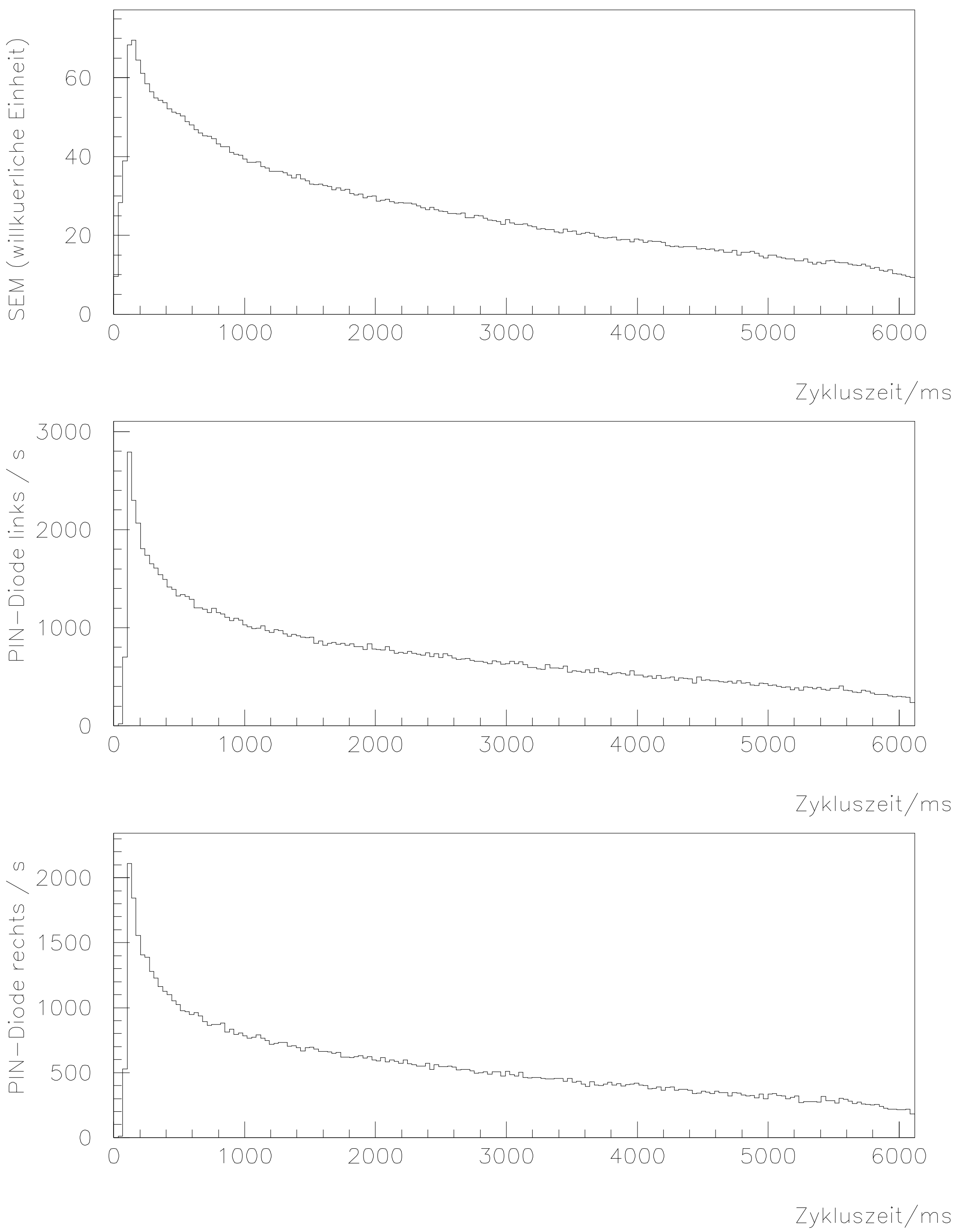


Abbildung 4.13: Erfassung der Luminositätssignale durch die Datenaufnahme Oben: SEM-Signal. Mitte: Zählrate der PIN-Diode links. Unten: Zählrate der PIN-Diode rechts

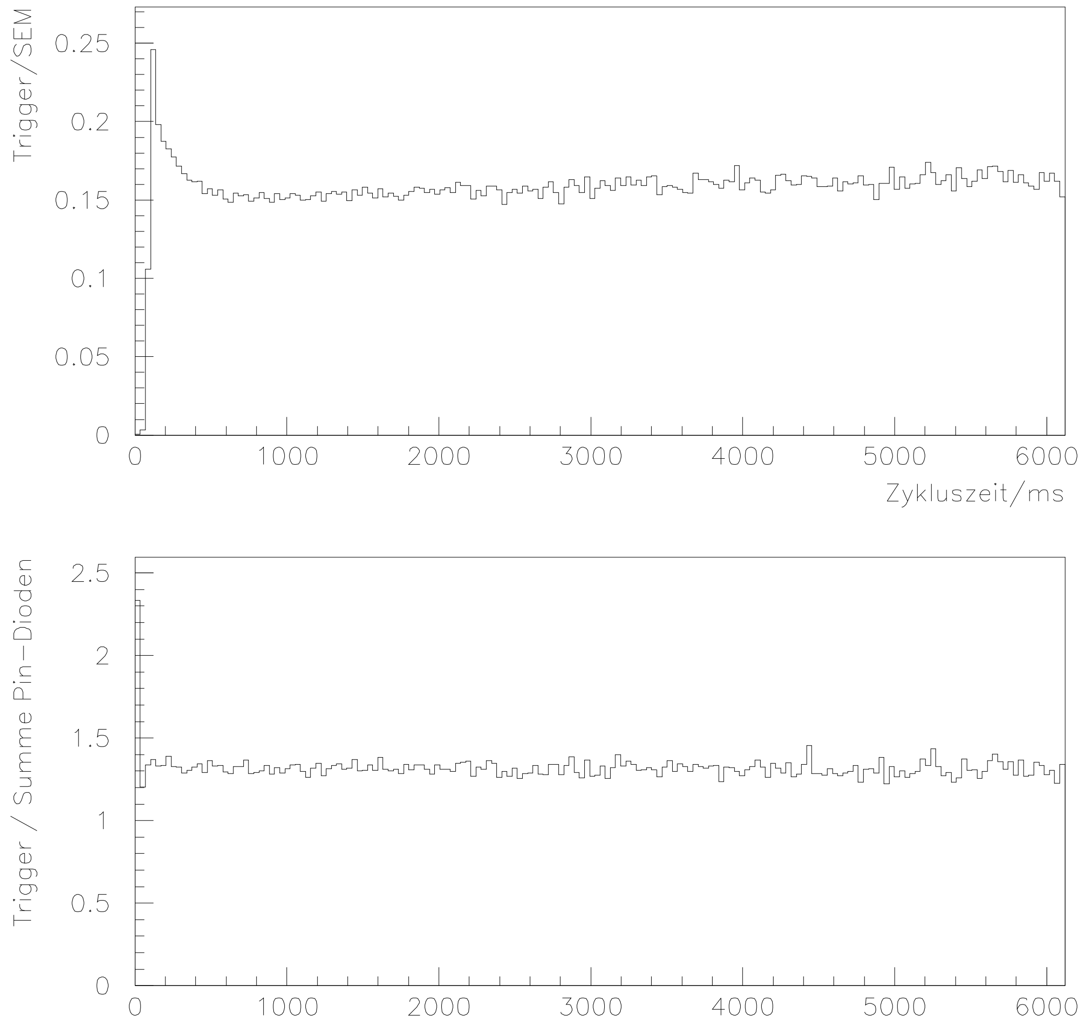


Abbildung 4.14: Oben: Triggerrate der Außenschale / SEM-Signal, Unten: Triggerrate der Außenschale / Summe der Zählraten von PIN-Diode rechts und links

die nicht der Luminosität proportional sind.

Für die Signale der PIN-Dioden ändert sich während der Beschleunigung Wirkungsquerschnitt und Raumwinkel der registrierten δ-Elektronen. Dieser Effekt ist prinzipiell sehr genau berechenbar. Da die PIN-Dioden jedoch auch andere Ejektile als Elektronen registieren, ist in weiteren Studien zunächst erforderlich, die von den Elektronen stammenden Signale vom "Untergrund" zu diskriminieren, um ein sicheres, quantitatives Maß zur Normierung der Raten während der Beschleunigung zu erhalten. Die weitere Untersuchung dieser Effekte ist zur zuverlässigen Bestimmung der relativen Luminosität notwendig und daher Gegenstand weiterer Messungen.

4.8 Messung während der Beschleunigung

Abb. 4.15 zeigt einen typischen Meßzyklus mit Datennahme während der Beschleunigung des Protonenstrahls. Dargestellt sind wieder COSY-Strahlimpuls, Targetposition, BCT-Signal und SEM-Signal (vgl. Abb. 4.1). Das Target wird bei $T_{in} = 75$ Mev in den Strahl gefahren und bei $T_{out} = 910$ MeV) wieder herausgefahren. Anhand des SEM-Signals erkennt man, daß die Lebensdauer des Strahls größer als die Verweildauer des Targets im

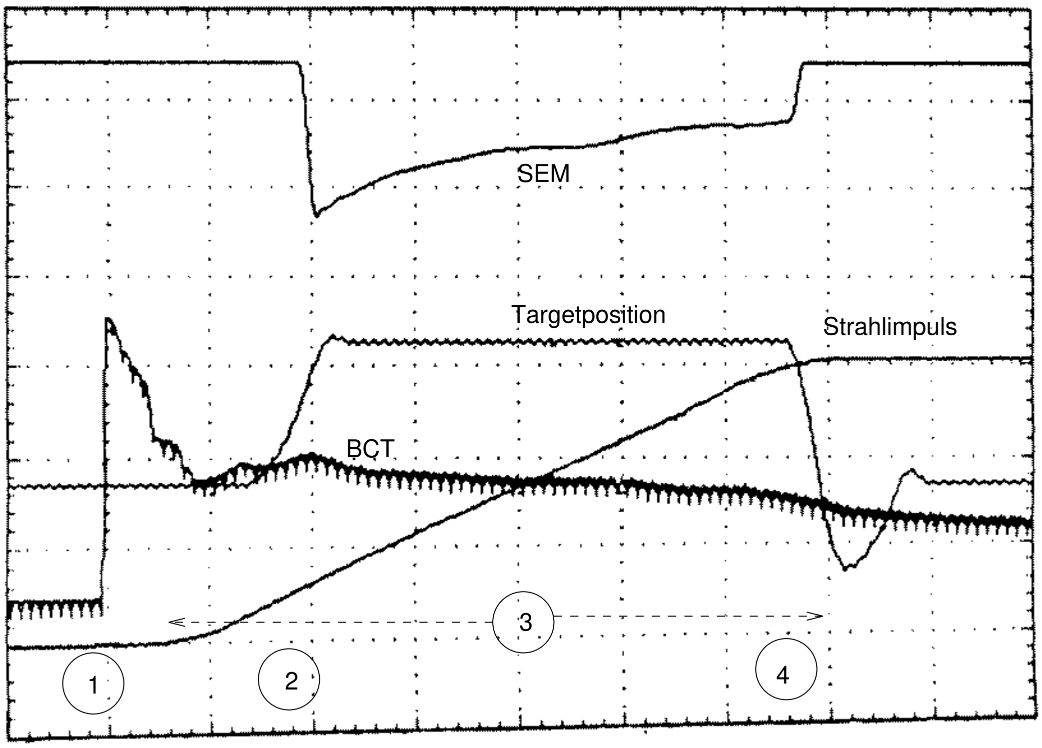


Abbildung 4.15: Meßzyklus während der Strahlbeschleunigung. 1: Injektion, 2: "Target In", 3: Beschleunigungsphase, 4: "Target Out". Die Zeitskala beträgt 200 ms/Rastereinheit.

Stahl ist. Weiterhin erkennt man, daß das SEM-Signal nicht mehr monoton fällt (vgl. Abb. 4.1), sondern gegen Ende der Wechselwirkungszeit kleine Unregelmässigkeiten zeigt. Dieser Effekt ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die sich während der Beschleunigung ändernde Strahllage bzw. änderndes Strahlprofil und damit schwankende Teilchendichte am Targetort zurückzuführen.

Die Indentifizierung elastischer Ereignisse geschieht wie bei Messungen bei fester Energie über die Koplanarität mit der Strahlachse sowie kinematischer Korrelation nach Formel 2.1. Da sich jedoch die Strahlenergie während der Messung ändert, andert sich auch das Produkt $\tan\theta_1 \tan\theta_2 = 1/\gamma^2$ der elastisch gestreuten Protonen. Da eine genaue Zeitinformation relativ zu Beginn des Zyklus in der Datenaufnahme mitgeführt wird, ist es möglich, die registrierten Ereignisse nach ihrer Position in der Beschleunigungsphase zu sortieren. Abb. 4.16 zeigt das aus den Treffern in den Halbringen rekonstruierte $\tan\theta_1 \tan\theta_2$ in Abhängigkeit der Zeit. Dabei ist wiederum der Zeitnullpunkt durch das von der COSY-Leittechnik gegebene Signal zum Fahren des Targets auf Wechselwirkungsposition gegeben. Für die gewählten Anfangs- und Endenergien ergibt sich $1/\gamma^2(T_{in}) = 0.883$ bzw. $1/\gamma^2(T_{out}) = 0.672$. Deutlich erkennbar ist die Häufung der elastischen Ereignisse gemäß der sich erhöhenden Strahlenergie während der Beschleunigung. Zu Beginn des Zyklus werden für eine Zeit von ca. 100 ms keine Ereignisse registriert, da das Target nach dem "Target In"-Signal erst in die Wechselwirkungsposition fahren muß, die Datenaufnahme jedoch bereits aktiv ist. Die untere Darstellung zeigt das in der Datenaufnahme mitgeführte dipolstromproportionale Frequenzsignal.

Durch die Kenntnis der COSY-Parameter für die Hochbeschleunigung in Abhängigkeit der COSY-internen Zeit ist es möglich, zu jedem Zeitintervall den Strahlimpuls zu bestimmen, da die Zeitpunkte t_{in}, t_{out} auf der Skala der COSY-internen Zeit definiert sind. Darüberhinaus liefert, wie ebenfalls aus Abb. 4.16 ersichtlich, das in die Datenaufnahme integrierte, dipolstromproportionale Frequenzsignal eine relative Erfassung des Strahlimpulses.

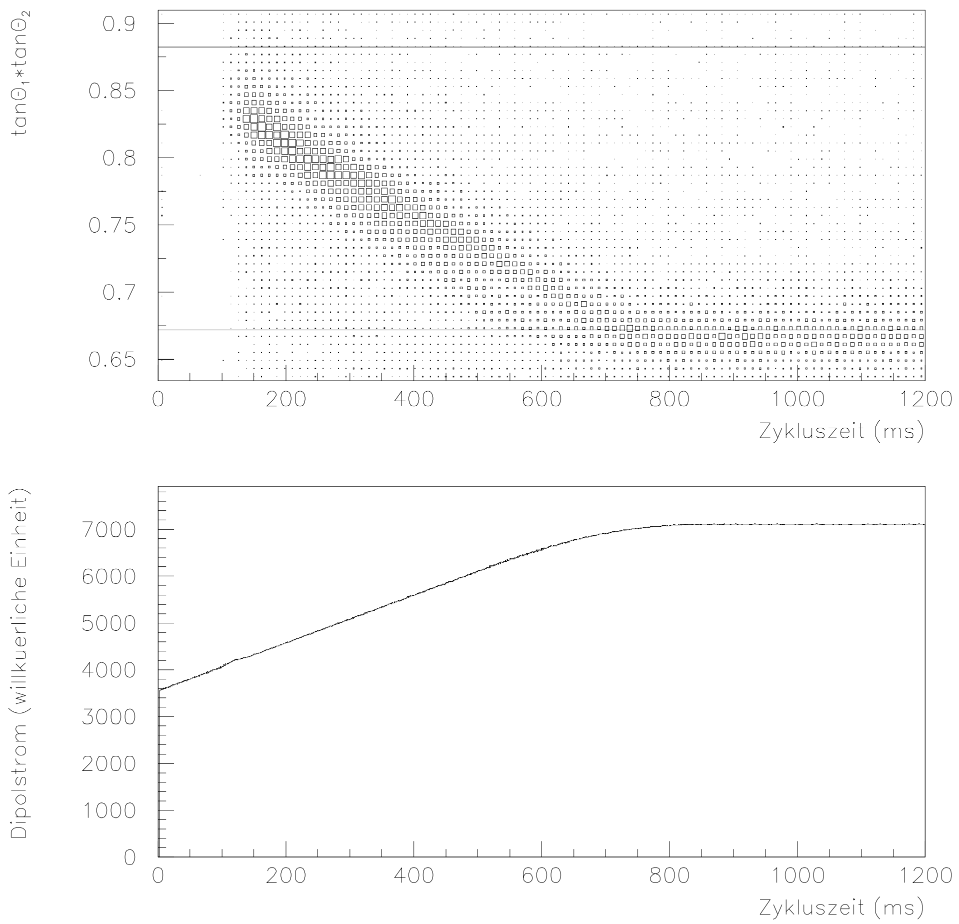


Abbildung 4.16: Identifizierung elastischer Ereignisse bei Messungen während der Strahlbeschleunigung. Oben: rekonstruiertes ($\tan\theta_1 \tan\theta_2$) gegen die Zykluszeit. Die Linien markieren $1/\gamma^2 = 0.883$ bzw. $1/\gamma^2 = 0.672$, wie es den Energien zu Beginn bzw. Ende der Beschleunigung entspricht. Unten: COSY-Dipolstrom ($\hat{=}$ Strahlimpuls).

5 Zusammenfasssung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein System zur Aufnahme und Analyse von Daten für das EDDA-Experiment am COSY-Beschleuniger des Forschungszentrums Jülich geplant, aufgebaut und in Betrieb genommen. Durch die Verwendung von Standardkomponenten im Hard- und Softwarebereich enstand ein modulares, flexibles System, welches unterschiedlichen Anforderungen im Bereich kleiner und mittlerer Experimente genügt. Dadurch wurde das System nicht nur für das EDDA-Experiment, sondern auch für weitere Experimente an COSY einsetzbar. Die Entwicklung der Software zur Datenaufnahme wurde durch die Adaption und Weiterentwicklung eines an der GSI Darmstadt entwickelten Programmpakets ("TDAS") vereinfacht.

Zur Datenkontrolle und -analyse während der Messung wurde ein neues Programm ("YODA") entwickelt, welches auf Basis einer interpretativen Programmiersprache experimentunabhängig Analysen sowohl im "Online" wie "Offline"-Betrieb ermöglicht. Schwerpunkte waren dabei einfacher, komfortabler Datenzugriff, hohe Entwicklungsgeschwindigkeit bei Datenanalysen und einfache Bedienbarkeit. Das Programm hat sich unter unterschiedlichen Experimentbedingungen bewährt und ermöglicht auch Benutzern ohne umfangreiche Programmierkenntnisse schnelle Ergebnisse bei der Datenanalyse.

Anhand von ersten Daten, die in der Meßperiode vom 13.6.–18.6.1994 gewonnen wurden, konnte gezeigt werden, daß Detektor, Datenaufnahme und -analyse zur Messung der elastischen Proton-Proton-Streuung in der angestrebten Genauigkeit geeignet sind. Durch die Wahl eines "defensiven" Triggers ist es möglich, alle in den Szintillatoren registrierten elastischen Ereignisse sicher zu erfassen. Der Anteil nicht elastischer Ereignisse — in der "defensiven" Triggereinstellung etwa 75 % — läßt sich in der Datenanalyse sicher abtrennen. Der vom Kohlenstoff stammende Untergrund ist anhand von Vergleichsmessungen mit aluminisierten Kohlenstofftargets gut diskriminierbar. Die Triggerlogik arbeitet zuverlässig und ist leicht an wechselnde Anforderungen anzupassen.

Die Meßverfahren zur relativen Luminositätsbestimmung liefern stabile Signale und sind in die Datenaufnahme integriert. Zur Absicherung der Tauglichkeit und Genauigkeit und schließlich zur Normierung der Zählraten sind jedoch noch weitere Messungen und Simulationsrechnungen erforderlich.

Erste Messungen während der Beschleunigungsphase (bei noch geringem Energiehub) zeigen, daß die Aufnahme von Anregungsfunktionen in der "multi-pass-technique" praktikabel ist. Die Identifizierung elastischer Ereignisse ist mit der gewünschten Energieschrittweite (Δ T = 2 MeV) aus den Daten leicht möglich.

Für die folgenden Meßperioden steht erstmals der volle COSY-Energiebereich bis T = 2.5 GeV zur Verfügung. Neben der vollständigen Bestückung der Außenschale steht im folgenden Zeitraum auch der Einbau der Detektor-Innenschale aus szintillierenden Fasern bevor. Die Auslese der Innenschale geschieht über das sog. PCOS-III System, welches in vergleichbarem Umfang bereits für das MOMO-Experiment an COSY erfolgreich in die Datenaufnahme integriert wurde [HEN94].

Der Bau des polarisierten Atomstrahltargets sowie die Präparation des polarisierten COSY-Strahls befinden sich in der Vorbereitung. Mit deren Realisierung kann dann das Meßprogramm von EDDA im ursprünglich geplanten Umfang und unter Einschluß von Polarisationsobservablen durchgeführt werden.

Anhang

Algorithmus zur Programmierung des kinematischen Triggers

Im folgenden ist der Algorithmus zur Programmierung der Memory Lookup Units für den kinematischen Trigger beschrieben (vgl. Abb. 5.1). Dabei wird zur Vereinfachung eine 16 Bit Input – 16 Bit Output MLU angenommen. Das — technisch bedingte – Aufspalten der 16 Bit Vorhersage-Tabellen auf 4 8x8 Bit Lookup-Units ist bereits in [SCH91] diskutiert und wird für die Programmierung verwendet.

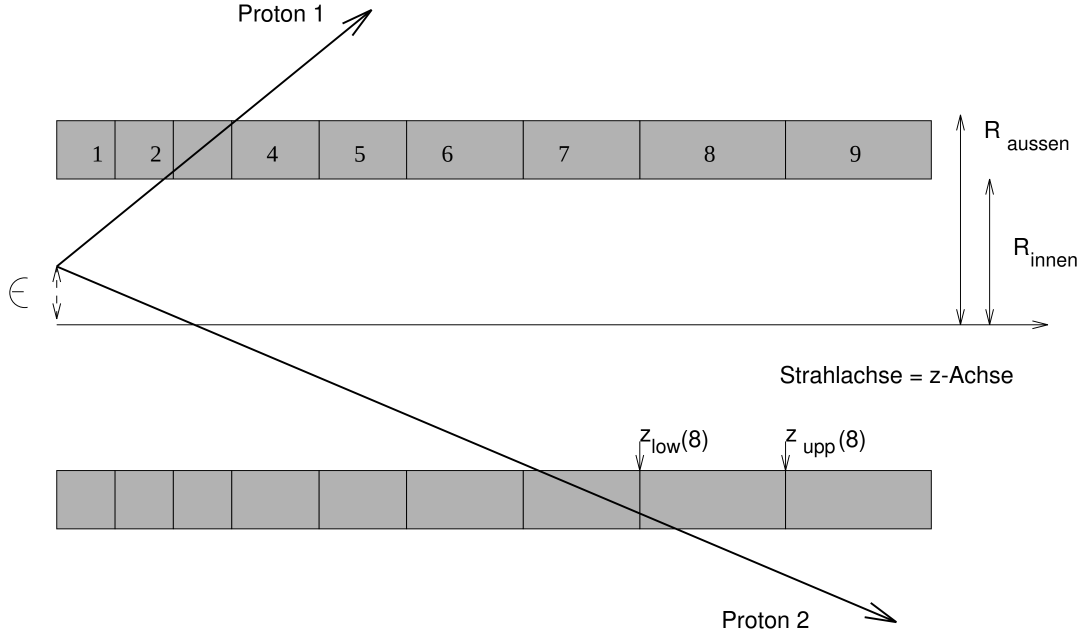


Abbildung 5.1: Geometrie zur Berechnung der kinematischen Vorhersagen (hier vereinfacht für 9 statt 29 Halbringe).

- Wähle kinetisches Energieintervall $[T_{min}, T_{max}]$, für das die kinematische Vorhersage erstellt werden soll.
- Wähle die maximale Exzentrizität ϵ_{max} der Ereignisse von der Strahlachse (gegeben durch die Breite des Strahlprofils längs des Fadentargets), die noch vom Trigger akzeptiert werden soll.
- Initialisiere die Ringgeometrie. Der Innenradius der Ringlage wird mit R_{innen}, der Außenradius mit $R_{außen}$ bezeichnet. Das Proton zu Rückwärtswinkeln wird mit dem

Index 1, das Proton zu Vorwärtswinkeln mit dem Index 2 bezeichnet. Ein Halbring wird in z-Richtung durch die Koordinaten z_{low} bzw. z_{upp} begrenzt. Die Halbringe zu mit wachsenden z-Koordinaten durchnummeriert.

- Berechne für alle Rückwärtswinkel-Halbringe R_i ihre kinematischen Vorhersagen. Dabei gibt es für jeden Halbring je eine Vorhersage mit minimalen und mit maximalem Winkel θ_2. Der Winkelbereich zwischen diesen Winkeln ist die Vorhersage für diesen Rückwärtswinkel-Halbring. Aus Formel 2.1 folgt:

$$\frac{z_1}{R_1}\frac{z_2}{R_2} = \frac{1}{\gamma^2} \tag{5.1}$$

$$\Rightarrow z_2 = \frac{R_2}{\gamma^2}\frac{R_1}{z_1} = \frac{R_1 R_2(1+T/2m_p)}{z_1} \tag{5.2}$$

  Dabei sind z_1, z_2 die z-Koordinaten der Schnitttpunkte der Trajektorien von Teilchen 1 und Teilchen 2 mit dem Zylindermänteln mit Radien R_1, R_2 (Für die Berechnung der Vorhersage mit minimalem und maximalem Winkel müssen aufgrund der endlichen Ringdicke unterschiedliche Radien verwendet werden). T ist die kinetische Energie des Protonenstrahls, m_p die Ruhemasse des Protons.

- Aus der Beziehung 5.2 erhält man die Vorhersage mit maximalem θ_{max} ($\widehat{=} z_2^{min}$) bei $T = T_{min}$, $z_1 = z_{upp}$ und $R_1 = R_2 = R_{außen}$, die mit minimalem θ_{min} ($\widehat{=} z_2^{max}$) bei $T = T_{max}$, $z_1 = z_{low}$ und $R_1 = R_{innen}$, $R_2 = R_{außen}$.

- Für von der Strahlachse exzentrische Ereignisse mit einem Versatz ϵ längs des Fadentargets müssen die Vorhersagen geringfügig korrigiert werden. Unter der Annahme eines solchen Versatzes lautet Gleichung 5.2:

$$z_2 = \frac{R_2-\epsilon}{\gamma^2}\frac{R_1+\epsilon}{z_1} = \frac{(R_1+\epsilon)(R_2-\epsilon)(1+T/2m_p)}{z_1} \tag{5.3}$$

  Die maximale z-Koordinate für z_2 ergibt sich durch Extremwertbetrachtung von Gleichung 5.3 für $\epsilon = (R_1 - R_2)/2$, real jedoch höchstens bei $\epsilon = \pm\epsilon_{max}$. Das globale Minimum liegt bei $\epsilon = +\epsilon_{max}$, falls $R_1 > R_2$ bzw. $\epsilon = -\epsilon_{max}$, falls $R_1 < R_2$. (Für $R_1 = R_2$ gibt es zwei Minima). Mit R_1 und R_2 wie im vorigen Abschnitt ergibt sich (jetzt unter Berücksichtigung der endlichen Ringdicke) die gleiche Berechnung wie bereits in [SCH91] diskutiert.

- Für jeden Rückwärtswinkel-Halbring mit der Nummer R_i existiert nun eine kinematische Vorhersage $z_2^{min}(R_i), z_2^{max}(R_i)$. Ermittle die Nummern der zugehörigen Vorwärtwinkel-Halbringe $V_{min}(R_i), V_{max}(R_i)$. Der Bereich zwischen diesen Halbringen ist die Gesamt-Vorhersage für jeden Rückwärtswinkel-Halbring im gegebenen Energiebereich.

- Erzeuge alle möglichen Treffermuster für die Rückwärtswinkel-Halbringe. Jedes Treffermuster entspricht dabei einer 16-Bit Speicherstelle ("input-pattern") in der MLU. Ermittle für jeden Treffer innerhalb des Treffermusters die zugehörige Vorhersage und bilde das logische ODER aller dieser Vorhersagen zu diesem Treffermuster. Dadurch wird errreicht, daß auch durch beliebige zufällige Koinzidenzen keine elastischen Ereignisse vom Trigger verworfen werden. Die "geoderten" Vorhersagen für alle Treffermuster bilden dann den Inhalt der MLU.

Literatur

[ARN83] R. A. Arndt et al., Phys. Rev. **D28** (1983) 97

[AUE89] I. P. Auer et al., Phys. Rev. Lett. 62 (1989) 2649

[BAL93] J. Ball et al., Phys. Lett. **B320** (1994) 206-210

[BIS93] J. Bisplinghoff et al., Nucl. Inst. and Meth. *A321* 1993 453

[BER85] R. Bertini et al., Phys. Lett. **B162** (1985) 77

[BOO91] G. Booch, Object-Oriented Design with Applications, Benjamin/Cummings, Redwood City, CA., 1991

[BOL92] R. Bollmann, Untersuchung dreieckiger Szintillatorstäbe mit azimutaler Auflösung für den EDDA-Detektor bei COSY, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1992

[CAN91] CANU, Kommission Datenaufnahme COSY, Summary of Recommendations, 1991

[COM91] D. E. Comer and D. L. Stevens, Internetworking with TCP/IP, Prentice Hall, Englewood Cliff, N.J., 1991

[DIE94] O. Diehl, Steuerung und Überwachung im EDDA-Experiment, Diplomarbeit, Universität Bonn, 1994

[EIS94] S. Eisenhardt, Konstruktive und apparative Entwicklungen zum Laser-Monitorsystem des EDDA-Detektors bei COSY, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1994

[FRI93] S. Fritz, Signalauslese und Zeitmessung für die Außenschale des EDDA-Detektors, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1993

[GAR85] M. Garçon et al. , Nucl. Phys. **A445** (1985) 669–684

[GRE95] J. Greiff, Diplomarbeit, Universität Hamburg, in Vorbereitung

[GRO93] R. Groß-Hardt, Simulation des EDDA-Detektors — erste Ergebnisse, Diplomarbeit, Universität Bonn, 1993

[HIN94] F. Hinterberger, persönliche Mitteilung, 1994

[HEN94] C. Henrich, persönliche Mitteilung, 1994

[JAH89] R. Jahn, A Precision Study of Near Threshold Meson Production via the Reactions $p + d \rightarrow {}^3He + \pi^+\pi^-$ and $p + d \rightarrow {}^3He + K^-K^+$, Proposal Nr. 6, vorgelegt dem Program Advisory Committee COSY Jülich, 1989

[JOH75] S. C. Johnson, Yacc – yet another compiler compiler, Computing Science Technical Report 32, AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, N.J., 1975

[KER77] B. Kernighan and D. Ritchie, The C Programming Language, Prentice Hall, Englewood Cliff, N.J., 1977

[KER84] B. Kernighan and R. Pike, The UNIX Programming Environment, Prentice Hall, Englewood Cliff, N.J., 1984

[LAH92] U. Lahr, EDDA — Ein Detektor zur Messung von Anregungsfunktionen der elastischen Proton-Proton-Streuung an COSY, Dissertation, Universität Bonn, 1992

[LIN89] V. Lindenstruth, TDAS— Temporary Data Acquisition System, GSI internal report, GSI Darmstadt, 1989

[LOC86] M. P. Locher, M. E. Saino, A. Svarc, Dibaryon Resonances, Adv. Nucl. Phys. **17** (1986) 47 and references therein

[MAN91] N. Mansfield, The X Window System: A User's Guide, Addison-Wesley, Reading, MA, 1991

[MOS91] F. Mosel, Die Eignung von Polypropylenfasern als internes Target für das EDDA-Experiment, Diplomarbeit, Universität Bonn, 1991

[MOS94] F. Mosel, Ein internes Wasserstofftarget für Speicherringexperimente, Dissertation, Universität Bonn, 1994

[MUE95] M. Müller, Diplomarbeit, Universität Hamburg, in Vorbereitung

[OST91] J. Ousterhout, An X11 Toolkit Based on the Tcl Language in *Proceedings of the Winter 1991 USENIX Conference*, pg. 105–115, USENIX Association, Berkeley, CA., 1991

[PAW94] CERN Program Library, Program PAW++, Version 2.06/02, 1994

[PER87] D. H. Perkins, Introduction to High Energy Physics, Addison-Wesley, Reading, MA., 1987

[RAD94] M. Radtke, Referenzsystem und Elektronik des Lasermonitorsystems am EDDA-Detektor, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1994

[ROH94] H. Rohdjeß and O. Diehl, Offline Analysis of EDDA Run June 13–17, 1994: Theta Reconstruction, EDDA internal report 94-02, Bonn University, 1994

[ROH94a] H. Rohdjeß, Proc. Physics with GeV Particle Beams, Forschungszentrum Jülich 1994, ed. H. Machner and K. Sistemich, World Scientific, Singapore, 1995, p. 331, in press

[ROH94b] H. Rohdjeß, Online/Offline Utilities for the EDDA-Experiment, EDDA internal report 94-00, Bonn University, 1994

[SAID93] R. A. Arndt et al., Computerprogramm SAID, Version 4/93

[SCH91] F. Schwandt, Konzeption, Aufbau und Test des Triggersystems für das EDDA-Experiment, Diplomarbeit, Universität Bonn, 1991

[SCE94] H. Scheid, Methoden zur Luminositätsbestimmung im EDDA-Experiment, Dissertation, Universität Bonn, 1994

[STE57] E. J. Sternglass, Theory of Secondary Electron Emmision by High-Speed-Ions, Phys. Rev. **108** (1957) 1

[SHI88] T. Shima, Nucl. Phys. **A478** (1988) 543c–549c

[SHZ94] H. Shimizu et al., Nucl. Phys. **A569** (1994) 791-820

[STR93] Bjarne Stroustrup: The C++ Programming Language, Addison-Wesley, Reading, MA., 1993

[TDA94] F. Schwandt, TDAS ISKP User's Guide, ISKP internal report, Bonn University, 1994

[WIE94] W. Wiedmann, Ein zylindrischer Detektor aus szintillierenden Fasern und erste Messungen zum EDDA-Experiment an COSY, Dissertation, Universität Bonn, 1994

[WOL92] K. Woller, Untersuchung halbringförmiger Plastikszintillatoren für das EDDA-Experiment am COSY-Jülich, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1992

[XWI90] R. Scheifler and J. Gettys, X Window System, Digital Press, Bedford, MA., 1990

[YOD94] F. Schwandt, YODA User's Guide, ISKP internal report, Bonn University, 1994

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. T. Mayer-Kuckuk und Prof. Dr. R. Maschuw für die Möglichkeit, die Arbeit am Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn durchführen zu können,

Herrn Prof. Dr. J. Bisplinghoff, unter dessen Leitung die Arbeit entstand, für seine hervorragende Betreuung, umfassende Ausbildung und vielfältige Unterstützung,

Herrn Prof. Dr. K. Kilian für die Übernahme des Korreferats,

Herrn Prof. Dr. F. Hinterberger für ständige Diskussionsbereitschaft und viele wertvolle Anregungen,

Herrn Prof. Dr. B. Schoch und Herrn Prof. Dr. R. Maschuw für die Unterstützung dieser Arbeit durch ein Promotionsstipendium im Rahmen des Graduiertenkollegs "Erforschung subnuklearer Strukturen der Materie",

Herrn Dr. H. Rohdjeß und Herrn Dipl. Phys. O. Diehl für ihre Unterstützung bei Datenanalyse, Triggeraufbau und Rechnerbetreuung,

allen Mitgliedern der EDDA-Kollaboration in Bonn und Hamburg sowie der MOMO-Kollaboration für gute Zusammenarbeit und erfolgreiche Strahlzeiten,

den Mitarbeitern der Werkstätten und des Elektroniklabors, insbesondere Herrn D. Wolf,

allen Mitarbeitern der Beschleunigermannschaft COSY.