Die Produktion des η-Mesons am Jülicher Beschleuniger COSY und Entwicklung eines optimierten Datenaufnahmesystems

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

der

Fakultät für Physik
und Astronomie

der Ruhr–Universität Bochum

von

Peter Wüstner

aus

Leipzig

Bochum 1998

Dissertation eingereicht am:
Tag der Disputation:
Referent:
Korreferent:

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Am Forschungszentrum Jülich steht seit 1993 der Beschleuniger COSY (**CO**oler **SY**nchrotron) für physikalische Experimente zur Verfügung. COSY ist als Teilchenquelle für die Physik im mittleren Energiebereich vorgesehen. Besonderes Ziel bei der Konzeption war die Bereitstellung eines Protonenstrahls mit hoher Phasenraumdichte für Experimente mit großer Genauigkeit. Dem sollen zwei verschiedene Methoden der Strahlkühlung, die Elektronenkühlung und die stochastische Kühlung, dienen. Zum Zeitpunkt des dieser Arbeit zugrundeliegenden Experimentes war die stochastische Kühlung jedoch noch nicht verfügbar.

Ein Grundriß der gesamten Anlage ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Das unten im Bild sichtbare Isochronzyklotron JULIC beschleunigt Pakete von H^--Ionen aus einer Ionenquelle auf eine Energie von 45 MeV. Diese werden über einen Injektionskanal COSY zugeführt und an einer Kohlenstoff-Folie umgeladen („gestripped"). Es können $2 \cdot 10^{11}$ Teilchen in dem Ring von etwa 185 m Umfang gespeichert und durch ein zeitlich veränderliches Hochfrequenzfeld auf eine Endenergie von bis zu 2.5 GeV beschleunigt werden. Die Protonen können an internen Strahlplätzen direkt genutzt oder über einen Extraktionskanal zu einem der externen Targetpunkte geleitet werden.

Einer der internen Experimentierplätze ist COSY–11[1], der seinen Platz in einer Bogensektion des COSY-Ringes gefunden hat. COSY–11 ist speziell für die Untersuchung von Erzeugungsreaktionen nahe der Produktionsschwelle geeignet. In dieser Arbeit soll die Reaktion $pp \to pp\eta$ untersucht werden. Von Bedeutung ist diese Reaktion unter anderem für

[1] In Ermangelung einer besseren Idee wurde die Bezeichnung des ersten Proposals [Oel88] beibehalten.

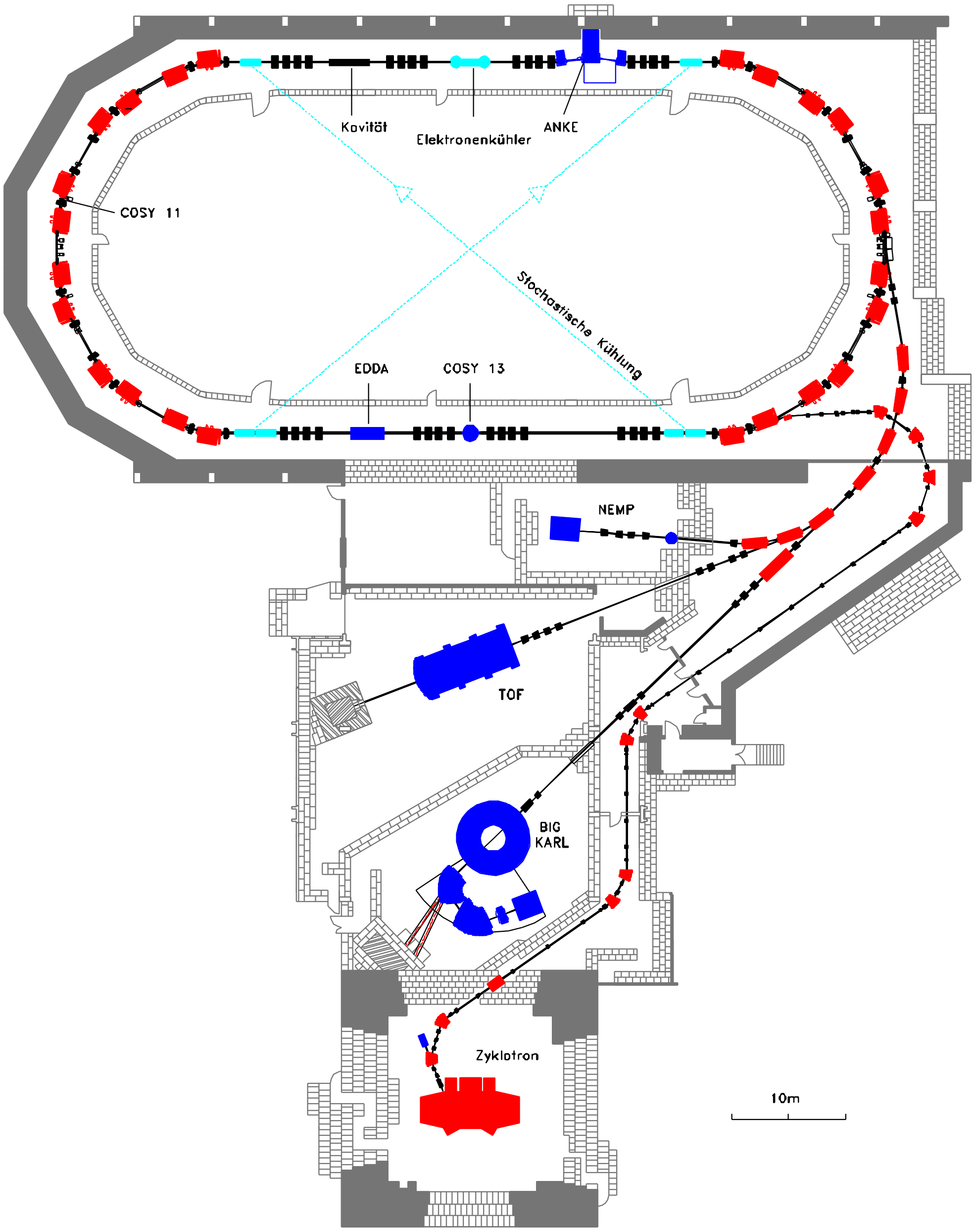

Abbildung 1.1: Das Jülicher **CO**oler **SY**nchrotron. COSY–11 befindet sich in der Bogensektion links oben im Bild.

das Verständnis des Strangeness[2]-Inhaltes dieses Mesons, wobei experimentelle Daten gerade in der Nähe der Produktionsschwelle weltweit bisher nur wenig verfügbar sind.

[2]Seltsamkeit

Gleichzeitig sollte am Beispiel dieses Experimentes die Leistungsfähigkeit des verwendeten Datenaufnahmesystems untersucht werden. Während auf Grund der starken Selektion durch einen wohldefinierten Trigger für COSY–11 derzeit kein Bedarf besteht, die laufende Datenaufnahme zu ersetzen, wurden die gewonnenen Erfahrungen als Grundlage für ein verbessertes Datenaufnahmesystem verwendet, das zunächst an einem anderen gerade im Aufbau befindlichen Experimentierplatz[3] Verwendung finden soll. Dieses Experiment ist eine erweiterte, größere spektrometrische Einrichtung als COSY–11, die im Frühjahr 1998 in Betrieb gehen wird.

[3]ANKE (**A**pparatus for Studies of **N**ucleonic and **K**aon **E**jectiles), früher 0°-Facility genannt.

Kapitel 2

Grundlagen und Motivation

2.1 Gebundene Zustände der starken Wechselwirkung

Im einfachsten Modell werden Hadronen in zwei Gruppen eingeteilt, mit Baryonen, die aus drei Quarks, und Mesonen, die aus Quark-Antiquark-Paaren aufgebaut sind. Quarks (und Antiquarks) sind die fundamentalen Bausteine der Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen. Die starke Wechselwirkung wird durch die Gluonen, elementare Bosonen mit Spin 1 $\hbar$, vermittelt. Quarks und Antiquarks haben einen Spin von 1/2 $\hbar$ und eine Baryonenzahl von 1/3 bzw. $-1/3$. Tabelle 2.1 zeigt die grundlegenden Eigenschaften der sechs bekannten Quarks. Zusätzlich trägt jedes Quark eine von drei möglichen Farbladungen (rot, grün, blau), Antiquarks tragen die entsprechenden Antifarben.

Name	Symbol	m /(MeV/c^2)	Q	I_3	S	C	B	T
Down	d	300 ± 100	$-1/3$	$-1/2$	0	0	0	0
Up	u	300 ± 100	$+2/3$	$+1/2$	0	0	0	0
Strange	s	450 ± 100	$-1/3$	0	-1	0	0	0
Charm	c	≈ 1500	$+2/3$	0	0	1	0	0
Bottom	b	≈ 4500	$-1/3$	0	0	0	-1	0
Top	t	≈ 180000	$+2/3$	0	0	0	0	1

Tabelle 2.1: Eigenschaften der bekannten Quarks (m= Masse, Q= elektrische Ladung in Elementarladungen, I_3= dritte Komponente des Isospins, S= Strangeness, C= Charm, B= Bottomness (=beauty), T= Topness (=truth))

Die Angabe einer konkreten Masse der Quarks ist problematisch, da einerseits Quarks als freie Teilchen nicht beobachtet werden können, andererseits die Quarks auch innerhalb der Hadronen stets von einer Wolke aus virtuellen Quark-Antiquark-Paaren und Gluonen umgeben sind. Man gibt deshalb eine sogenannte Konstituentenmasse an, die aus der Masse und der Systematik der aus ihnen aufgebauten Hadronen gewonnen wird. Die Massen der „nackten“ Quarks sind wahrscheinlich sehr viel kleiner (für die beiden leichtesten Quarksorten z.B.: $\approx 5 - 15$ MeV/c^2 beim Down- und $\approx 2 - 8$ MeV/c^2 beim Up-Quark) [Povh97]

Die gebundenen Zustände der Quarks und Gluonen sind die Hadronen. Auf Grund des Confinements[1] können Quarks und Gluonen niemals einzeln auftreten, beim Versuch der Trennung werden so hohe Energien benötigt, daß neue Quark-Antiquark-Paare aus dem Vakuum erzeugt werden und die Quarks wieder nur in gebundenen Zuständen existieren.

Bei der Kombination der Quarks zu Hadronen gilt es, bestimmte Regeln zu beachten. Die Summe der elektrischen Ladungen und der Baryonenzahlen muß jeweils ganzzahlige Werte annehmen und die Farbladungen müssen eine farblose Kombination ergeben.
Eine Möglichkeit ist es, drei Quarks oder Antiquarks unterschiedlicher Farbe zu kombinieren, dabei entstehen die farbneutralen Baryonen oder Antibaryonen, einige leichte Vertreter dieser Gruppe sind in Tabelle 2.2 zu finden.

Symbol	Quarks	m/(MeV/c^2)	Q	I_3	S
p	uud	938.27	+1	+1/2	0
n	udd	939.57	0	−1/2	0
Λ^0	uds	1115.68	0	0	−1
Σ^+	uus	1189.37	+1	0	−1
Σ^0	uds	1192.55	0	0	−1
Σ^-	dds	1197.44	−1	0	−1
Ξ^0	uss	1314.9	0	0	−2
Ξ^-	dss	1321.32	−1	0	−2

Tabelle 2.2: Eigenschaften einiger leichter Baryonen; für die jeweiligen Antibaryonen ändern sich die Vorzeichen von Q, I_3 und S.

Wenn man jeweils ein Quark und ein Antiquark (mit Farbe und passender Antifarbe) kombiniert, erhält man Mesonen mit Baryonenzahl 0 und ganzzahligem Spin. Dabei hat man auf Grund der unterschiedlichen

[1] confinement: Einschluß

	J^{PC}	L	S
pseudoskalare Mesonen	0^{-+}	0	0
Vektormesonen	1^{--}	0	1
skalare Mesonen	0^{++}	1	1
Axialvektormesonen	1^{+-}	1	0

Tabelle 2.3: Parität und Ladungskonjugation von Mesonen (P = Parität, C = Ladungskonjugation, J = Gesamtdrehimpuls, L = Bahndrehimpuls, S = Gesamtspin)

Spin-Kopplungen und Relativdrehimpulse der Konstituenten zwischen pseudoskalaren Mesonen, Vektormesonen, Axialvektormesonen und skalaren Mesonen zu unterscheiden. In Tabelle 2.3 sind ihre entsprechenden Quantenzahlen zusammengestellt.

2.2 Pseudoskalare Mesonen

Mit den Bezeichnungen P für Parität und C für Ladungskonjugation zeichnen sich die pseudoskalaren Mesonen durch die Quantenzahlen $J^{PC} = 0^{-+}$ aus, wobei die Ladungskonjugation nur für neutrale Mesonen definiert ist. Die drei leichtesten Quarks (u, d, s) und ihre entsprechenden Antiteilchen lassen sich zu neun Kombinationsmöglichkeiten für Quantenzahlen der pseudoskalaren Mesonen zusammenfassen, die in Tabelle 2.4 dargestellt sind. Die einfachen Kombinationen ($\mathrm{u\overline{u}}$), ($\mathrm{d\overline{d}}$) und ($\mathrm{s\overline{s}}$)

	u	d	s
$\overline{\mathrm{u}}$	π^0, η, η'	π^-	K^-
$\overline{\mathrm{d}}$	π^+	π^0, η, η'	$\overline{K}^0$
$\overline{\mathrm{s}}$	K^+	K^0	η, η'

Tabelle 2.4: Kombination der drei leichtesten Quarks zu pseudoskalaren Mesonen

werden im pseudoskalaren Sektor experimentell nicht beobachtet, statt dessen findet man Teilchen, die Überlagerungen der Wellenfunktionen dieser Kombinationen entsprechen:

$$\begin{aligned}
\pi^0 &= (\mathrm{u\overline{u}} - \mathrm{d\overline{d}})/\sqrt{2} \\
\eta &\approx (\mathrm{u\overline{u}} + \mathrm{d\overline{d}} - 2\mathrm{s\overline{s}})/\sqrt{6} \\
\eta' &\approx (\mathrm{u\overline{u}} + \mathrm{d\overline{d}} + \mathrm{s\overline{s}})/\sqrt{3}
\end{aligned}$$

Die pseudoskalaren Mesonen können in ein Singulett und ein Oktett der Symmetrie-Gruppe SU(3) eingeordnet werden, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Überlagert man das Singulett und das Oktett, so erhält man ein

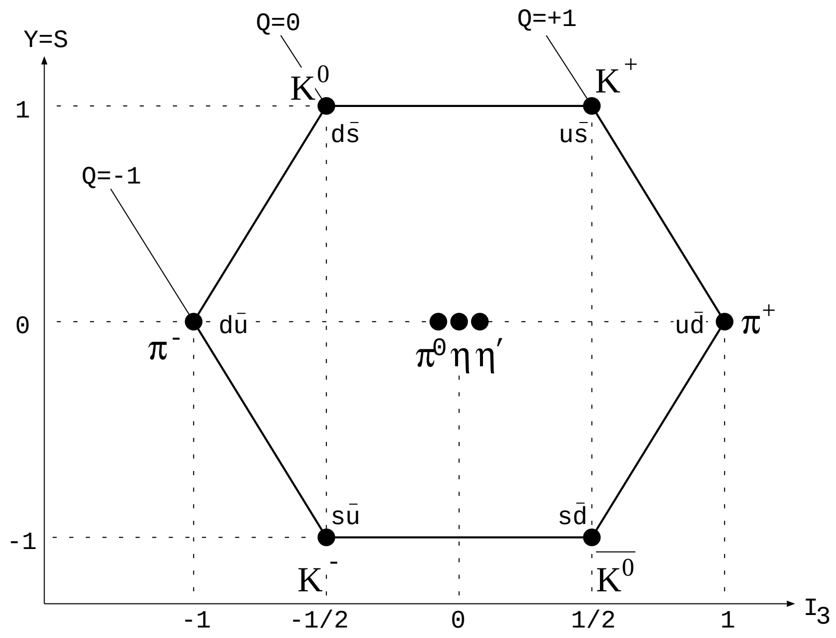

Abbildung 2.1: SU(3)–Nonett der pseudoskalaren Mesonen; die neutralen Mesonen im Zentrum sind Überlagerungen der $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ und $s\bar{s}$–Zustände. (I_3: Isospin, Y: Hyperladung mit $Y = B + S$ (B: Baryonenzahl $=0$), Q: Ladung mit $Q = I_3 + \frac{1}{2}Y$)

Nonett, in dem Quark-Antiquark-Kombinationen mit identischen additiven Quantenzahlen gemischt werden können. Dies geschieht im Zentrum des Nonetts, wobei sich die beobachtbaren Zustände η, η' und π^0 ergeben.

In Tabelle 2.5 sind die wichtigsten Eigenschaften der pseudoskalaren Mesonen erfaßt.

Symbol	m[MeV/c^2]	Q	I_3	S	mittlere Lebensdauer [s]	wichtige Zerfälle
π^+	139.57	+1	+1	0	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+\nu_\mu$
π^-	139.57	−1	−1	0	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^-\overline{\nu}_\mu$
π^0	134.98	0	0	0	$0.8 \cdot 10^{-16}$	$\gamma\gamma$
η	547.30	0	0	0	$5.5 \cdot 10^{-19}$	$\gamma\gamma$ 3π
η'	957.78	0	0	0	$2.4 \cdot 10^{-21}$	$\eta\pi\pi$ $\rho^0\gamma$
K^+	493.68	+1	+1/2	1	$1.24 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+\nu_\mu$ $\pi^+\pi^0$
K^-	493.68	−1	−1/2	−1	$1.24 \cdot 10^{-8}$	$\mu^-\overline{\nu}_\mu$ $\pi^-\pi^0$
K_L^0	497.67	0			$5.2 \cdot 10^{-8}$	3π $\pi e\nu$
K_S^0	497.67	0			$8.9 \cdot 10^{-11}$	2π

Tabelle 2.5: Eigenschaften pseudoskalarer Mesonen

2.3 η-Mesonen

Die η– und η'–Mesonen sind Mischzustände aus den reinen SU(3)-Zuständen η_1 (Singulett) und η_8 (Oktett):

$$\eta = \eta_8 \cos\Theta - \eta_1 \sin\Theta \qquad (m_\eta = 547.30 \text{ MeV/c}^2) \tag{2.1}$$

$$\eta' = \eta_8 \sin\Theta + \eta_1 \cos\Theta \qquad (m_{\eta'} = 957.77 \text{ MeV/c}^2) \tag{2.2}$$

mit

$$\eta_1 = \frac{(\mathrm{u\overline{u}} + \mathrm{d\overline{d}} + \mathrm{s\overline{s}})}{\sqrt{3}} \qquad \text{und} \qquad \eta_8 = \frac{(\mathrm{u\overline{u}} + \mathrm{d\overline{d}} - 2\mathrm{s\overline{s}})}{\sqrt{6}} \tag{2.3}$$

Der Mischungswinkel Θ beträgt etwa $-20°$, so daß das η–Meson im wesentlichen dem η_8 und das η'-Meson dem η_1 entspricht.

Die Lebensdauer des η–Mesons bei Zerfall in den 2γ-Kanal ist $5.5 \cdot 10^{-19}$ s, das entspricht einer partiellen Zerfallsbreite von 1.2 keV. Tabelle 2.6 zeigt die häufigsten Zerfallskanäle.

Zerfallskanäle	Anteil
2γ	(39.21±0.34)%
$3\pi^0$	(32.2±0.4)%
$\pi^+\pi^-\pi^0$	(23.1±0.5)%
$\pi^+\pi^-\gamma$	(4.77±0.13)%

Tabelle 2.6: Zerfallskanäle des η–Mesons [PDG97]

Die γ-Quanten und die neutralen π-Mesonen sind mit dem Detektorsystem von COSY–11 nicht beobachtbar, lediglich die geladenen $\pi^\pm$ können nachgewiesen werden, wobei die geringe geometrische Akzeptanz eine sehr kleine Effizienz bewirkt.

Die bisher bekannten Wirkungsquerschnitte der Produktion des η-Mesons im Schwellenbereich über die Reaktion pp $\to$ ppη sind in Abbildung 2.2 zusammengestellt. Für die Analyse des Produktionsmechanismus sind weitere Messungen im schwellennahen Bereich erforderlich.

Abbildung 2.3 zeigt eine Veranschaulichung der η–Produktion bei der Proton-Proton-Steuung. Hierbei wird angenommen, daß das η-Meson dominant über die Anregung einer N*–Resonanz entsteht [Sch95]. Der absolute Wirkungsquerschnitt wird dabei im wesentlichen durch die Art der

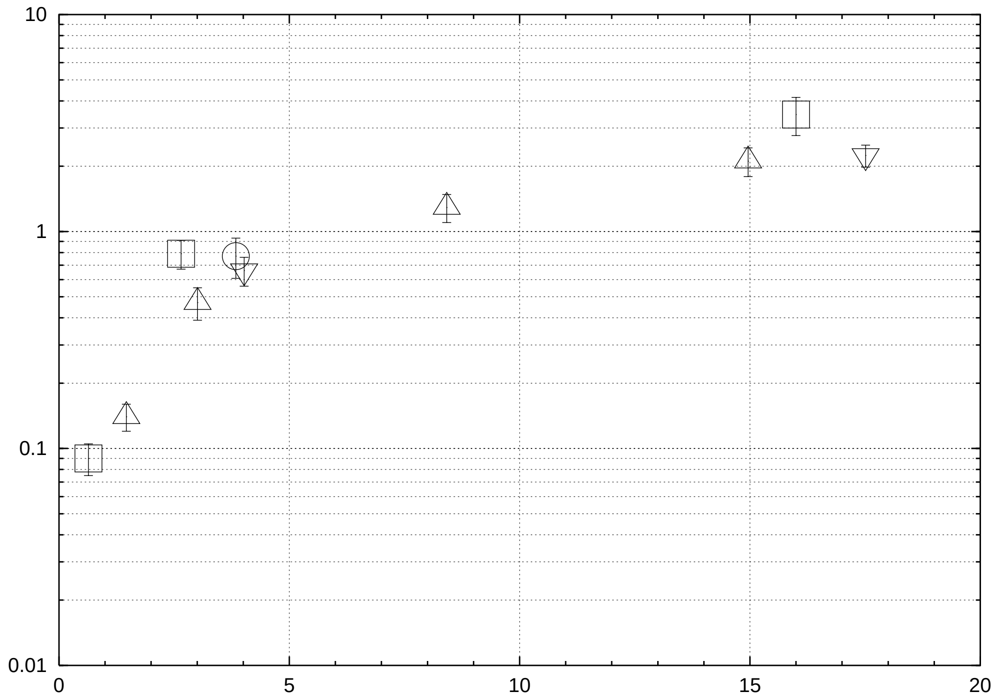

Abbildung 2.2: Totaler Wirkungsquerschnitt der Reaktion $pp \to pp\eta$; □: Bergdolt 1993 [Ber93], △: Calén 1996 [Cal96], ▽: Chiavassa 1994 [Chia94], ◯: COSY–11 1995 [COS95],

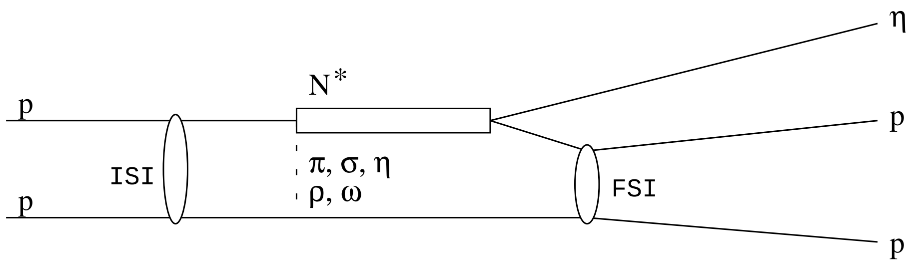

Abbildung 2.3: Vorstellung der η–Produktion in pp-Kollisionen (ISI: initial state interaction; FSI: final state interaction).

beteiligten Mesonen im Mesonenaustauschprozeß bestimmt.

Bei ruhendem Target erfordert die Reaktion $pp \to pp\eta$ (unter Verwendung der η-Masse von 547.30 MeV/c^2 [PDG97]) Strahlprotonen mit einer Energie von mindestens 1254.2 MeV, das entspricht einem Impuls von 1981.6 MeV/c.

Kapitel 3

Experimenteller Aufbau

3.1 Der Beschleuniger COSY

Das **CO**oler **SY**nchrotron COSY hat einen Umfang von etwa 185 m und kann Protonen auf Impulse bis zu etwa 3.5 GeV/c bei einem Injektionsimpuls von 295 MeV/c beschleunigen. Das entspricht kinetischen Energien von 2680 MeV bzw. 45 MeV. Im Fall von Wasserstofftargets stehen damit Energien von effektiv 20 MeV bis etwa 1 GeV im Schwerpunktsystem zur Verfügung.

Das Isochronzyklotron JULIC (siehe Bild 1.1 auf Seite 2) beschleunigt in Intervallen von 33 ns Pakete von H^--Ionen auf eine Energie von 45 MeV. Diese werden über einen Injektionskanal COSY zugeführt und an einer Kohlenstoff-Folie umgeladen. Nach einer etwa drei Sekunden dauernden Beschleunigung und Strahlpräparation können die Protonen längere Zeit im Ring gespeichert werden.

Durch eine Elektronenkühlung [Bud76] im Bereich bis 645 MeV/c und eine stochastische Kühlung [Mee72] oberhalb von 1.5 GeV/c soll eine Strahlemittanz von $1\pi \cdot \mathrm{mm} \cdot \mathrm{mrad}$ und eine Impulsunschärfe von $\frac{\Delta p}{p} = 10^{-4}$ erreicht werden.
Zum Zeitpunkt des dieser Arbeit zugrundeliegenden Experiments war die stochastische Kühlung jedoch noch nicht voll funktionsfähig und konnte nicht eingesetzt werden. Die Verkleinerung des Phasenraumes durch einen möglichen Einsatz der Elektronenkühlung wäre bei der nachfolgenden Beschleunigung auf etwa 2 GeV/c zwar erhalten geblieben, jedoch würde die Strahlqualität durch das Emittanzwachstum verlorengehen. Ohne Kühlung wird von COSY eine Genauigkeit des Strahlimpulses von etwa $\frac{\Delta p}{p} = 5 \cdot 10^{-4}$ erreicht.

Da COSY nicht nur Beschleuniger, sondern gleichzeitig auch Speicherring ist, besteht die Möglichkeit, sehr dünne Targets innerhalb des Beschleunigerringes zu positionieren und damit den Strahl mit bis zu etwa $2 \cdot 10^{11}$ gespeicherten Protonen mehrfach (etwa 10^6 mal pro Sekunde) zu nutzen. Da sich jedoch durch die Wechselwirkung mit dem Target der Strahl erwärmt und damit der Anteil des Strahlprofiles, der das Target überlappt, kleiner wird, gleichzeitig die Wechselwirkungen mit der Wand des Strahlrohres unnötigen Untergrund erzeugen, wurde im gegenwärtigen Experiment in Intervallen von fünf Minuten ein neuer Protonenstrahl injiziert und beschleunigt. Wenn die stochastische Kühlung im Routinebetrieb funktioniert, wie bei der Strahlzeit von COSY–11, die im Februar 1998 stattfand, wird dieser Effekt weitgehend vermeidbar sein und Zyklusdauern von mehr als einer Stunde ermöglichen.

3.2 Das Experiment COSY–11

COSY–11 ist eine interne Experimentiereinrichtung in einer Bogensektion von COSY. Bei Experimenten nahe der Erzeugungsschwelle von Teilchen (bei an COSY verfügbaren Energien nur Mesonen) liegen die Bahnen der Reaktionsprodukte im Laborsystem innerhalb eines eng begrenzten Kegels um die Bewegungsrichtung des gemeinsamen Schwerpunktes. Dadurch ist mit einem relativ kleinen Detektorsystem eine hohe geometrische Akzeptanz erreichbar. Unmittelbar über der Produktionsschwelle wird der gesamte Kegel von den Detektoren überdeckt, so daß eine 4–π-Akzeptanz gegeben ist. Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des Experimentes COSY–11.

Die Protonen des COSY-Strahls treffen auf die Protonen des Wasserstoff-Cluster-Targets (siehe Kapitel 3.3). Der nachfolgende COSY-Ablenkmagnet wird gleichzeitig als Analysator verwendet. Das ist nicht ideal, da das Magnetfeld und damit die Ablenkung der Reaktionsprodukte jeweils durch die COSY-Parameter festgelegt und nicht mehr frei wählbar sind, führt jedoch zu einem einfachen und preiswerten Experimentaufbau. Negativ geladene Reaktionsprodukte werden in Richtung Dipoljoch abgelenkt und treffen dort auf einen (in Abbildung 3.1 nicht dargestellten) Silizium-Pad-Detektor (Kapitel 3.4.1).
Positiv geladene Reaktionsprodukte durchlaufen nacheinander die zwei Driftkammerpakete D1 und D2 (Kapitel 3.4.2), die Szintillatorarrays S1 und S2 (Kapitel 3.4.3) und, nach etwa neun Metern Flugstrecke, die Szintillatorwand S3 (Kapitel 3.4.4).

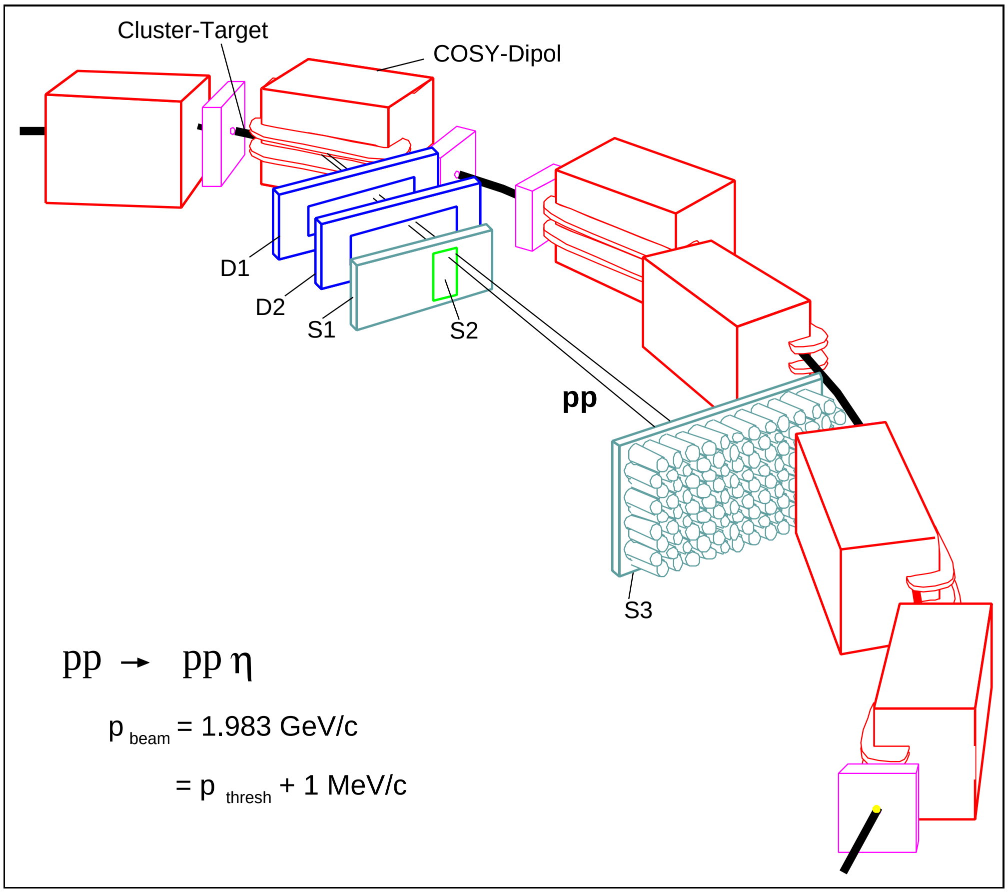

Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der COSY–11-Installation. (D1 und D2: Driftkammern, S1 und S2: Start-Szintillatoren, S3: Szintillatorwand)

3.3 Das Wasserstoff-Cluster-Target

Bei Beschleunigerexperimenten insbesondere bei der Untersuchung von Reaktionen mit kleinem Wirkungsquerschnitt muß man möglichst hohe Luminositäten erreichen. Um Mehrfachreaktionen im Target zu vermeiden, sollte das Target aber keine allzu hohe Dichte aufweisen. Zusätzlich verlangt man natürlich eine hohe Reinheit des Targetmaterials.

Die Strahlteilchen durchqueren das Target einige 10^6 mal je Sekunde. Der Anteil der Teilchen, der durch hadronische Reaktionen verlorengeht, ist bei internen Experimenten gering, aber durch Coulombstreuung wird der Strahl „erwärmt“, abgelenkte Teilchen können den vom Beschleuniger akzeptierten Phasenraum verlassen und treffen die Strahlrohrwand.

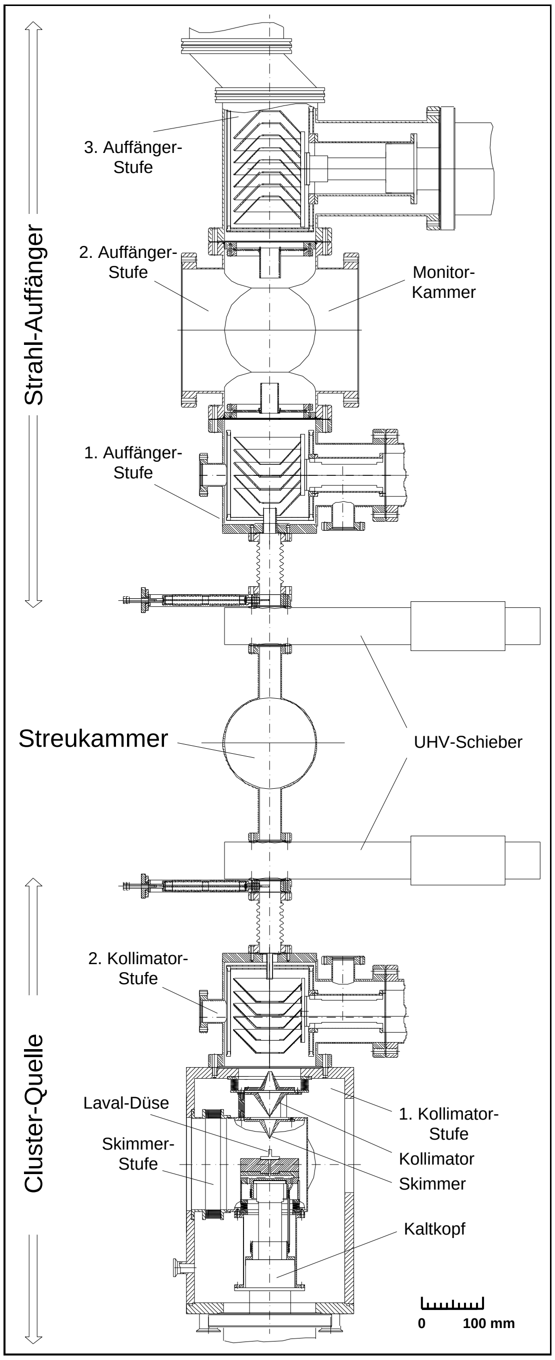

Abbildung 3.2: Aufbau des Wasserstoff-Clustertargets.

Durch eine Strahlkühlung kann diesem Effekt entgegengewirkt werden. Dabei sollte die Erwärmung durch Wechselwirkungen mit dem Target ausreichend gering sein.

Diese Forderungen werden von Feststofftargets oder Flüssigkeitstargets mit dem notwendigen Behälter nur in begrenztem Maße erfüllt. Statt dessen wird bei COSY–11 ein Wasserstoff-Cluster-Target eingesetzt [Dom97].
In Abbildung 3.2 ist schematisch der Aufbau des Cluster-Targets gezeigt. Ein bei hohem Druck vorgekühltes Gas expandiert adiabatisch durch eine sogenannte Laval-Düse in ein Gebiet kleineren Druckes und kühlt sich dabei weiter ab. Mit Erreichen der Dampfdruckkurve kondensiert das übersättigte Gas zu Clustern mit bis zu 10^6 Atomen.
Die Cluster werden, wegen ihrer vergleichsweise großen Masse, bei Stößen mit Restgaspartikeln nur wenig abgelenkt. Geometrisch wird die Ausbreitung des Clusterstrahls durch Blenden festgelegt, dadurch wird der Wechselwirkungspunkt zwischen umlaufendem Strahl und Target mit hoher Genauigkeit definiert, ein unnötiges Eindringen des Targetgases in die Streukammer wird weitgehend vermieden.
Nicht kondensiertes Restgas wird durch kegelförmige Blenden (Skimmer und nachfolgende Kollimatorstufen) abgetrennt. Nach Durchlaufen der Streukammer wird der Clusterstrahl in einem dreistufigen Auffänger gestoppt. Die zweite Auffängerstufe enthält eine Monitorkammer, in der über elastische Elektronenstreuung das Profil des Clusterstrahls beobachtet werden kann.
Erreichbare Dichten des Cluster-Targets liegen bei etwa $2 \cdot 10^{14}$ Atomen pro cm^3; der Durchmesser des Clusterstrahls am Wechselwirkungspunkt beträgt in der gegenwärtigen Konfiguration 9 mm.

3.4 Die Detektoren

3.4.1 Die Silizium–Pad–Detektoren

Elastisch gestreute Protonen werden durch einen im Targetbereich aufgestellten Monitor-Detektor nachgewiesen [Köh95] (Abbildung 3.3).
Er bildet elektrisch gesehen eine Einheit mit dem sogenannten K^--Detektor, der sich im Polspalt des Dipolmagneten zwischen Streukammer und Joch befindet. Bei der hier untersuchten Reaktion findet der K^--Detektor keine Verwendung. Die Detektoren sind aus identischen Modulen mit jeweils vier getrennten Siliziumstreifen (Pads), einem Design des PS202-Experimentes (JETSET [Ber95]) entsprechend, aufgebaut. Diese Module sind in drei sich leicht überlappenden Reihen so angeordnet, daß nichtsensitive Zwischenräume vermieden werden (Abb. 3.4). Die Pads sind 4.5 mm × 22.6 mm groß, ihre Dicke ist 280 μm.

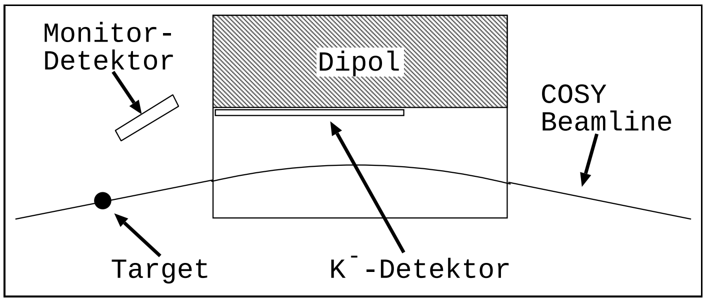

Abbildung 3.3: Anordnung des Monitordetektors im Targetbereich und des K$^-$-Detektors im Dipol.

Der Monitordetektor besteht aus 144 solcher Pads, der K$^-$-Detektor aus 720.

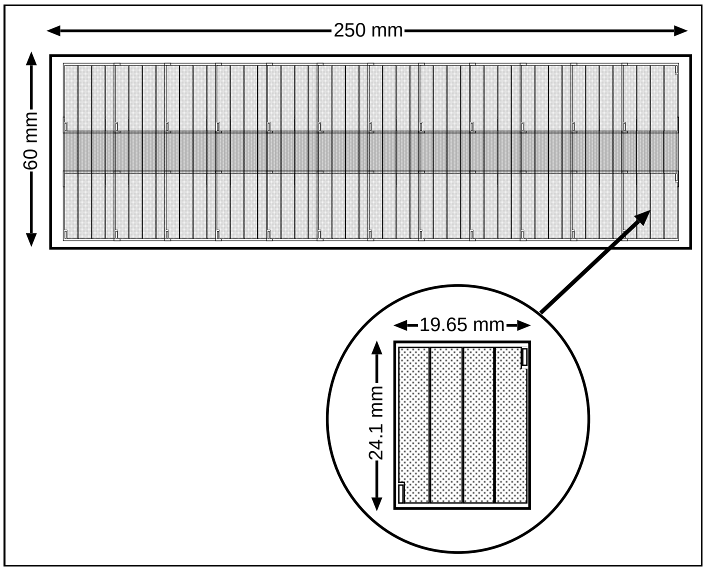

Abbildung 3.4: Struktur der Silizium-Pad-Detektoren am Beispiel des Monitor-Detektors.

3.4.2 Die Driftkammern

Die Richtungsbestimmung der Reaktionsprodukte erfolgt mit Hilfe zweier Driftkammersysteme im Abstand von 70 cm. Beide bestehen aus mehreren Ebenen vertikaler sowie um $+31°$ bzw. $-31°$ gegenüber der Vertikalen

geneigter Feld- und Signaldrähte (Abb. 3.5).
Die dem Dipolmagneten am nächsten stehende Kammer hat sechs sol-

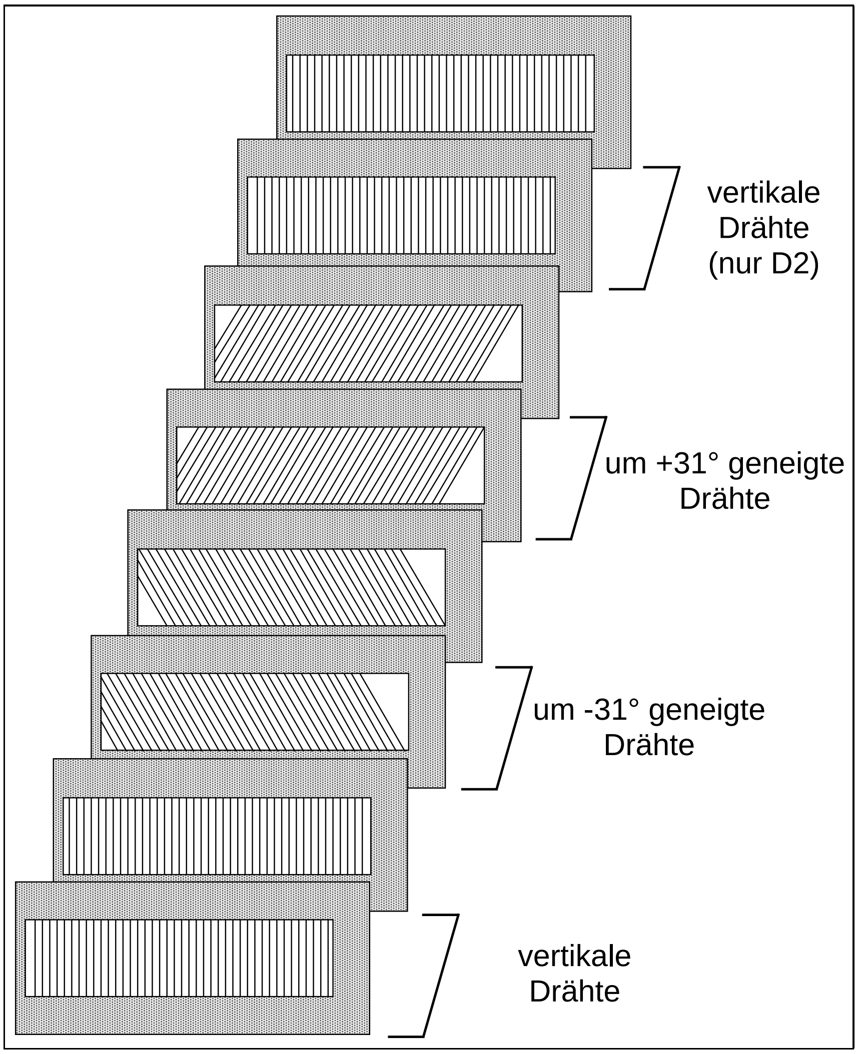

Abbildung 3.5: Anordnung der Ebenen mit unterschiedlicher Orientierung der Signaldrähte in den Driftkammersystemen D1 und D2.

cher Ebenen im Abstand von 18 mm, die andere acht. Beide Kammern werden mit einer Argon-Ethan-Mischung betrieben und erreichen eine Auflösung von etwa 200 μm bei Protonen mittleren Impulses (1 GeV/c). Wegen ihrer geometrischen Anordnung relativ zum Dipolmagneten können die Kammern nur von positiv geladenen Teilchen erreicht werden. Auch wenn einige Ebenen nicht ansprechen, kann wegen der Redundanz eine Rekonstruktionseffizienz von fast 100 % erreicht werden.

3.4.3 Die Startszintillatoren

Direkt hinter der zweiten Driftkammer, siehe Abbildung 3.1 auf Seite 15, befinden sich zwei Gruppen von Szintillatorhodoskopen aus jeweils 16 Szintillatorstreifen ($45 \times 10 \times 0.4$ cm^3 und $45 \times 1.35 \times 0.2$ cm^3) aus dem Material BC 404 [Bic].
Das Hodoskopsystem erlaubt Zeitauflösungen zwischen 160 ps und 220 ps für den Nachweis minimal ionisierender Teilchen.
Häufig wird bei COSY–11 das Auftreten zweier Protonen im Ausgangskanal als Triggerbedingung verwendet, so daß das Hodoskopsystem diese auflösen können sollte. Die Szintillatorgruppe mit den schmaleren Streifen hat eine geeignete horizontale Auflösung, deckt aber nicht den gleichen Bereich wie das größere Hodoskop ab, da auch sie nur aus 16 Streifen besteht. Jedoch ist sie verschiebbar angebracht und kann vor dem Experiment an den geeignetsten Ort gebracht werden.
Alle Streifen werden jeweils oben und unten von Sekundärelektronenvervielfachern (Photomultipliern) ausgelesen. Das Summensignal der beiden Photomultiplier eines Segmentes ist in guter Näherung vom Auftreffort des Teilchens unabhängig und liefert ein Maß für den Energieverlust des Teilchens im Szintillator.

3.4.4 Die Szintillatorwand

Nach dem Vorbild des an der Universität Bonn entwickelten AMADEUS-Detektors [Ant91] wurde eine großflächige Szintillatorwand realisiert, die in einer Entfernung von 9.1 m von dem Szintillatorarray S1 aufgestellt ist. Ein Querschnitt dieses Detektors ist in Abbildung 3.6 gezeigt.
Er besteht aus einer 100 cm $\times$ 220 cm $\times$ 5 cm großen Szintillatorplatte (BC 404 [Bic]) und 217 Photomultipliern (Thorn Emi 9954B [Emi]), die in einer Matrix aus gleichseitigen Dreiecken von 11.5 cm Seitenlänge im Abstand von 4 cm von der Szintillatorplatte montiert sind.
Die Abstände der Photomultiplier untereinander und von der Szintillatorwand sind so gewählt, daß pro eintreffendem Proton (oder anderem geladenen Teilchen) mindestens drei Multiplier signifikant ansprechen. Durch die Lichtbrechung an der Szintillatoroberfläche wird bewirkt, daß die Lichtintensität mit zunehmendem Abstand von der Spur des Teilchens stark abnimmt. Gleichzeitig wird dadurch garantiert, daß (fast) nur direktes Licht die Photomultiplier trifft, so daß eine zeitliche Auflösung von unter 200 ps unabhängig vom Auftreffort erreicht wird [Wol93]. Über die Amplitudenverteilung des Gesamtsignals auf die einzelnen Photomultiplier ist eine Ortsauflösung von etwa einem Zentimeter bei Einzeltreffern möglich.

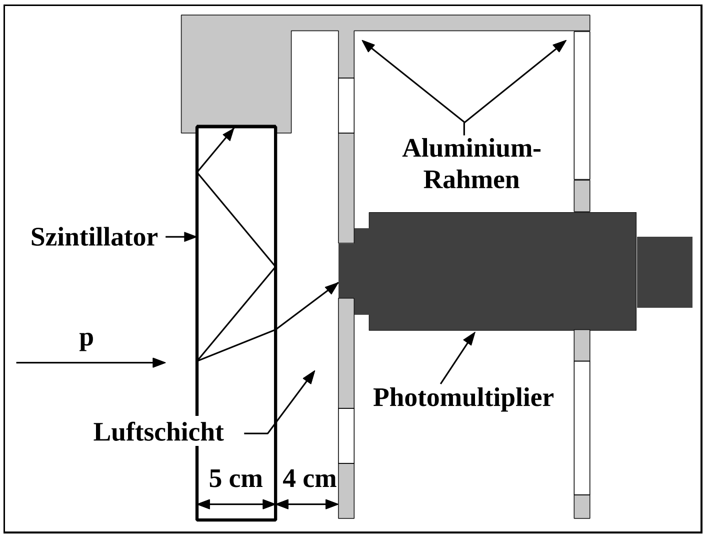

Abbildung 3.6: Schnittzeichnung der Szintillatorwand AMADEUS.

3.5 Der Trigger

Für die Reaktion $pp \rightarrow pp\eta$ sind solche Ereignisse interessant, bei denen zwei Protonen den Startszintillator S1 durchdringen und die Szintillatorwand S3 treffen.

Die realisierte Triggerbedingung fordert, daß von zwei S1-Segmenten beide Photomultiplier eines Segmentes ein Signal liefern, oder daß die Summe der Signalamplituden der beiden Multiplier eines S1-Segmentes dem Energieverlust zweier Protonen entspricht. Dabei werden in dem hier untersuchten Experiment und dem gewählten Impulsbereich nur die vier dem Strahlrohr nächstliegenden Segmente berücksichtigt, da andere Segmente aus kinematischen Gründen nicht erreicht werden können. Gleichzeitig wird gefordert, daß wenigstens drei Multiplier der Szintillatorwand S3 ein Signal liefern.

Die zwei Protonen im Ausgangskanal von elastischen Reaktionen können nicht beide gleichzeitig den Szintillator S1 treffen, sondern verteilen sich auf S1 und den Silizium-Monitor-Zähler. Um trotzdem solche Ereignisse mit aufzeichnen zu können, wurden auch Einzeltreffer im S1 durch die Triggerbedingung akzeptiert, allerdings um einen Faktor 2^8 untersetzt.

Kapitel 4

Das modulare objektorientierte Datenaufnahmesystem EMS

4.1 Einleitung

Für alle nichttrivialen Experimente benötigt man ein mehr oder minder komplexes Datenaufnahmesystem. Der Aufwand, ein solches neu zu entwickeln, ist recht hoch, besser wäre es, ein bereits entwickeltes und erprobtes zu verwenden. Das erweist sich aber als nicht immer realisierbar, da viele derartige Systeme speziell auf die Hardware des jeweiligen Experiments abgestimmt sind und nicht oder nur mit erheblichem Aufwand an andere Experimentumgebungen angepaßt werden können. Aus diesem Grunde wurde in der vorliegenden Arbeit im Zentrallabor für Elektronik des Forschungszentrums Jülich ein eigenes Datenaufnahmesystem entwickelt.
Da das zugrundeliegende Konzept für das Verständnis der folgenden Kapitel unumgänglich ist, sollen an dieser Stelle die Grundzüge dieses Datenaufnahmesystems erläutert werden. Eine ausführliche Darstellung findet sich in [Dro96].

Folgende Grundforderungen sollten durch dieses Datenaufnahmesystem erfüllt werden:

- Modularität
  Durch einen modularen Aufbau wird eine bessere Wartbarkeit möglich, einzelne Komponenten (Software und Hardware) können modifiziert oder ausgetauscht werden, ohne andere Komponenten verändern zu müssen.

- Konfigurierbarkeit
  Hard- und Software sollen unterschiedlichen Experimenten und veränderten Anforderungen in einer Experimenteinrichtung einfach angepaßt werden können.

- Skalierbarkeit
  Unterschiedliche Anforderungen an die Leistung des Systems sollen durch Auswahl mehr oder weniger schneller Hardware und Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl von gleichartigen Geräten befriedigt werden. Diese Forderung ist natürlich mit Modularität und Konfigurierbarkeit untrennbar verbunden.

- Portabilität
  Es sollte möglichst auf Funktionen verzichtet werden, die nur auf bestimmten Plattformen verfügbar sind, um das System leicht an den Fortschritt der Technologie anpassen zu können. Wenn es sich nicht vermeiden läßt, sollte eine allgemeine Schnittstelle definiert werden, mit Hilfe derer auf plattformspezifische Bibliotheken zugegriffen werden kann.

- Effizienz
  Trotz Konfigurierbarkeit durch interpretative Abarbeitung soll auch eine hohe Leistung (Geschwindigkeit) erreicht werden. Daher ist ein Kompromiß zwischen Interpreter und Verwendung fertig compilierter Prozeduren zu finden.

Diese Forderungen führten zu einem verteilten Datenaufnahmesystem, bei dem jedes Crate mit Digitalisierungsmodulen über einen eigenen Prozessor verfügt. Die dort implementierten Ausleseprozeduren werden jeweils bei Eintreffen eines Triggers in allen Prozessoren synchron gestartet und lesen dann unabhängig voneinander ihre Digitalisierungshardware aus. Die so gewonnenen Teile des Einzelereignisses (Subevents) werden später von einem Eventbuilder wieder zusammengesetzt.

Die Konfigurierung und Steuerung erfolgt über ein eigenes Protokoll von einer Workstation aus. Vorbild dafür ist die Manufacturing Message Specification (MMS - ISO 9506). MMS ist ein Teil des Manufacturing Automation Protocol (MAP), welches einen Standard für die gesamte Kommunikation in einer Fertigungsumgebung in der industriellen Automatisierung zur Verfügung stellt.
Es wurde aber keineswegs eine Neuimplementation von MMS vorgenommen, statt dessen wurden nur die Ideen übernommen, die für Experimentsteuerung und Datenerfassung nötig sind. Dieses Protokoll wurde „Experimental Message Specification“ (EMS) genannt. Einen guten Überblick

darüber gibt [Zwo94]. Ursprünglich war damit tatsächlich nur das Protokoll für die Kommunikation zwischen einzelnen Teilen der Experimentsoftware gemeint, im Laufe der Zeit ist dieser Name aber auf das gesamte verwendete Softwarepaket übertragen worden.

4.2 Hardwarestruktur

Die Modularität von EMS erlaubt die Verwendung einer breiten Palette von Front-End- und Eventbuilder-Hardware. Manche Möglichkeiten jedoch, wie zum Beispiel die Verwendung von OS–9-Net über VICBus zur Kommunikation, sind nicht mehr von praktischer Bedeutung. Andere wiederum sind nicht vollständig implementiert, sondern nur als Bibliotheksschnittstelle oder als Funktionsrümpfe vorhanden, so daß sie bei Bedarf problemlos eingefügt werden können (z.B. FVSBI von CES als Fastbus-Controller).
Als Beispiel für einen konkreten Aufbau kann natürlich COSY–11 dienen (Abbildung 5.1 auf Seite 34).
Die gesamte Steuerung erfolgt von der Workstation aus. Sie ist über das KFA-Netz (Ethernet) mit dem weltweiten Internet verbunden. Über ein zweites Ethernet-Interface kommuniziert sie mit dem Eventbuilder und den Crate-Controllern. Diese Abtrennung des Experimentnetzes vom öffentlichen Netz hat mehrere Gründe:

- Das Experimentnetz ist damit unabhängig von Fehlfunktionen und Überlastungen des KFA-Netzes.
- Das KFA-Netz wird von internem Datenverkehr, z.B. Eventdaten für eine Online-Analyse, freigehalten.
- Bei Bedarf kann die Router-Funktion der Workstation abgeschaltet werden, wodurch jeglicher direkte Zugriff auf die Front-End-Prozessoren verhindert wird.

Bei EMS wird zwischen Eventdatenfluß und Steuerungsdatenfluß (Control-Fluß) unterschieden. Während für den Eventdatenstrom die maximale Datenübertragungsrate entscheidend ist, ist sie für die Steuerungsdaten von untergeordneter Bedeutung. Es ist aber eine ständige Erreichbarkeit der Front-End-Prozessoren notwendig, so daß der Control-Fluß nicht durch anderen Datenverkehr, z.B. die Eventdaten, blockiert werden darf. Deshalb erlaubt EMS für beide Datenströme unabhängige Übertragungswege.

Bei COSY–11 laufen alle Steuerungsdaten zwischen Workstation und Front-End-Prozessoren über Ethernet (TCP/IP)[1], während die Eventda-

[1] **T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol/**I**nternet **P**rotocol

ten von den Crate-Controllern über Subeventreader zum Eventbuilder fließen. Ein Teil der Eventdaten wird vom Eventbuilder an die Workstation geleitet, um schon während der Messung zu Kontrollzwecken zur Verfügung zu stehen. Diese Daten werden wie die Steuerungsdaten über Ethernet transportiert.

4.3 Eventsynchronisation

Die Aufnahme der Eventdaten mit mehreren Crates und ihnen zugeordneten Prozessoren bringt ein besonderes Problem mit sich. Jeder Crate-Controller liest aus seiner Hardware (CAMAC oder Fastbus) einen Teil der Daten (ein Subevent) aus, die später, eventuell erst nach einigen Sekunden, vom Eventbuilder zu Events zusammengesetzt werden. Zu diesem Zweck bekommt jedes Event eine eindeutige Nummer, die bereits in den Header eines jeden Subevents eingetragen wird. Durch Fehler in der Elektronik ist es jedoch prinzipiell möglich, daß ein Crate-Controller einen Triggerimpuls „übersieht". Er wird dann die entsprechende Eventnummer an das darauffolgende Subevent vergeben, und der Eventbuilder setzt die Events falsch zusammen. Durch Software kann dieser Fehler nicht bemerkt werden. Einziger Ausweg ist, daß die Eventnummern an einer zentralen Stelle erzeugt und an die einzelnen Crate-Controller übermittelt werden.
Bei COSY–11 wird zu diesem Zweck eine Entwicklung der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) Darmstadt eingesetzt [Ess92]. Jedes an der Auslese beteiligte Crate bekommt dabei ein zusätzliches *Synchronisations-Modul*. Eines dieser Module fungiert als Master, alle anderen als Slaves. Sie sind untereinander durch einen *Synchronisationsbus* verbunden. Der originale Triggerimpuls steht dem Master an einem seiner Eingänge zur Verfügung und wird von diesem, zusammen mit der Eventnummer, an die Slaves weitergeleitet. Nach einer technisch bedingten Verzögerung (ca. 100 ns) wird ein Gatesignal als Start für die Digitalisierungsmodule erzeugt. Weitere Trigger werden nicht akzeptiert, bis alle Crate-Controller mit Hilfe der Slavemodule über den Synchronisationsbus gemeldet haben, daß sie die Daten vollständig ausgelesen haben. Jedes Slavemodul zählt auch unabhängig vom Master die Events und vergleicht diese Zahl mit der Eventnummer. Bei Nichtübereinstimmung wird die Messung mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

4.4 VEDs (Server)

Mit der Abkürzung VED (Virtual Experimental Device) werden innerhalb von EMS unterschiedliche Dinge bezeichnet[2].
Einmal ist es das eigentliche virtuelle Device, das heißt, ein abstraktes Gerät, daß über eine genormte Schnittstelle bedient werden kann. Das VED ist damit auch ein Container für eine Anzahl von EMS-Objekten, die ihrerseits wieder unterschiedliche, speziellen Zwecken dienende, Schnittstellen anbieten.
Andererseits ist VED ein EMS-Objekt, also ein Bestandteil des oben erwähnten abstrakten Gerätes, mit dessen Hilfe man das Verhalten des Gerätes innerhalb der Datenaufnahme beinflussen kann.
Oft wird VED auch (hier tatsächlich fälschlicherweise) mit dem realen Gerät, also z.B. einem CAMAC-Crate samt Controller identifiziert. In der Tat dient ein solches virtuelles Device dazu, die Eigenschaften und Möglichkeiten eines realen Gerätes nach außen hin durch eine einheitliche Schnittstelle anzubieten.
Das reale Gerät ist dabei entweder ein sogenanntes Front-End-Gerät, also z.B. ein CAMAC- oder Fastbus-Crate, das die Signale der Detektoren digitalisiert, oder ein Subeventreader bzw. Eventbuilder, dessen Aufgabe es ist, die Daten von den Front-Ends zu übernehmen und weiterzuleiten. Dabei übernimmt ein Subeventreader die Daten mehrerer Front-Ends und bietet sie dem Eventbuilder an, der Eventbuilder sammelt die Daten mehrerer Subeventreader, schreibt sie auf ein Speichermedium (meist ein Magnetband) und leitet sie gleichzeitig zur Experiment-Workstation zum Zwecke einer sofortigen (einfachen) Darstellung.
Die interne Funktionsweise von Subeventreader und Eventbuilder ist nahezu identisch, so daß beide als Eventmanager bezeichnet werden.

Im weiteren werden der Einfachheit halber die Softwareprogramme, die nach außen die VED-Schnittstelle anbieten, VED genannt. Die VEDs, die einem Front-End-Gerät zugeordnet sind, werden als Crate-Controller bezeichnet.

Die Steuerung der VEDs erfolgt nach dem Client-Server-Prinzip, d.h. die VEDs haben keine eigene Benutzerschnittstelle, statt dessen besitzen sie eine Kommunikationsschnittstelle, über die andere Programme Kommandos übermitteln können. Diese anderen Programme (Clients) laufen (meist) auf der Experiment-Workstation. Nur sie haben eine Benutzerschnittstelle. Die VEDs sind aus ihrer Sicht Server.
Die Schnittstelle zwischen Client und Server benutzt zwei grundlegende Konzepte: Dienste und Objekte. Ein Client kann von einem Server die

[2] Das ist ein Designfehler, er wurde aber zu spät bemerkt, und nun haben sich alle daran gewöhnt.

Erbringung eines Dienstes verlangen, dazu gibt er ein Objekt an, auf das sich dieser Dienst beziehen soll und zusätzlich weitere Daten, deren Art vom jeweiligen Dienst und Objekt abhängt. In EMS werden folgende Objekte verwendet:
VED: Das zentrale Objekt zur Darstellung eines realen Gerätes, es entspricht einem Frontend-Crate oder einem Eventmanager.
Variablen: Sie bieten die Möglichkeit, Datenworte und -felder zwischen Client und Server auszutauschen.
Domains: Sie dienen der Ablage verschiedener Informationen, die aus der Sicht der Kommunikation unstrukturiert sind. Die Interpretation erfolgt durch andere Objekte.
Programmaufrufe: Ein Programmaufruf (Programinvocation) steht für einen eigenständig ablaufenden Vorgang. Dieser erfüllt, durch Konfigurationsdaten (Domains) gesteuert, bestimmte Teilaufgaben des Gerätes.
Instrumentierungssysteme: Eine logisch oder physikalisch definierte Menge von Frontendelektronik.
Datenausgabegeräte: Eine Abstraktion der Eigenschaften von Datenspeichergeräten und Datenausgabegeräten.

Da EMS nur näherungsweise objektorientiert ist, gibt es auch Dienste, die sich auf kein spezielles Objekt beziehen. Ein Beispiel ist „get_namelist“, das die Liste aller in einem VED definierten Objekte liefert.
Bei einer für die nähere Zukunft ins Auge gefaßten Verwendung von CORBA[3], einem streng objektorientiertem Kommunikationsprotokoll, für die Kommunikation zwischen EMS-Server und Clients wird diese Objekt-Dienst-Beziehung neu überdacht werden müssen.

4.4.1 Front-End (Crate Controller)

Die in den Front-End-Prozessoren ablaufenden Server-Prozesse haben die Aufgabe, die Eventdaten aus der Digitalisierungshardware auszulesen und einem Eventbuilder oder Subeventrader zur Verfügung zu stellen.
Dazu werden die Digitalisierungsmodule in *Instrumentierungssysteme* aufgeteilt. Ein Instrumentierungssystem ist ein aus logischen oder technischen Gründen zusammengehörender Teil der auszulesenden Hardware. Jedem Instrumentierungssystem wird eine Liste von Readoutprozeduren zugeordnet, die bei jedem Auftreten eines Triggers abgearbeitet wird. Die Readoutprozeduren selbst sind nicht Bestandteil von EMS, sie werden auch als *lokale Prozeduren* bezeichnet. Sie sind speziell an die verwendete Hardware angepaßt. Die ausgelesenen Daten werden mit einem Vorspann (Header) versehen, in dem zusätzliche Informationen stehen (Eventnum-

[3]**C**ommon **O**bject **R**equest **B**roker **A**rchitecture [OMG96]

mer, Länge) und als Subevent zum Eventbuilder transportiert. Der Weg zum Eventbuilder wird durch ein Dataout-Objekt beschrieben, jedoch kann dieses aus Effektivitätsgründen meist nicht wie beim Eventbuilder verändert werden. Bild 4.1 zeigt die (naturgemäß stark vereinfachte) Struktur eines Front-End-VEDs.

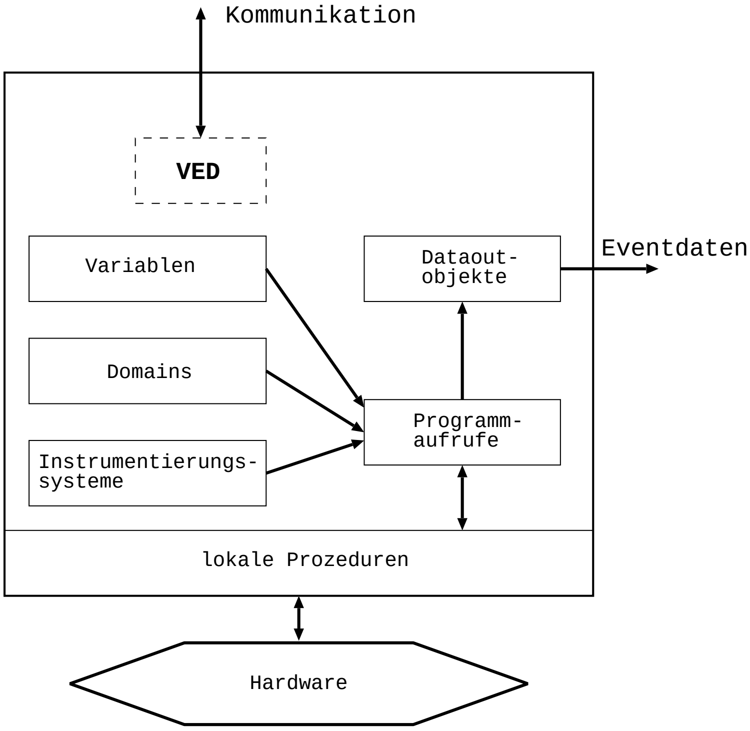

Abbildung 4.1: Struktur eines Front-End-VEDs (vereinfacht).

4.4.2 Eventmanager

Eventmanager haben die Aufgabe, Daten vom Front-End zum Speichermedium und zu einem „Online-Display" zu transportieren. Das optimierte Datenaufnahmesystem bringt hier wesentliche Änderungen, also ist eine genauere Darstellung der Arbeit des Eventmanagers angebracht.
Der Eventmanager besitzt Dateneingänge (Datains) und Datenausgänge (Dataouts). Die Datains sind mit den Datenausgängen der Crate-Controller verbunden, die Dataouts sind entweder Massenspeicher (z.B. ein Magnetbandgerät), oder sie sind mit anderen Prozessen, z.B. auf der Experimentworkstation, verbunden. Die Dateneingänge und Datenausgänge des Eventmanagers können beim Beginn der Messung in weiten Grenzen

frei konfiguriert werden.
Jeder Front-End-Prozessor (hier auch Crate-Controller genannt) erzeugt

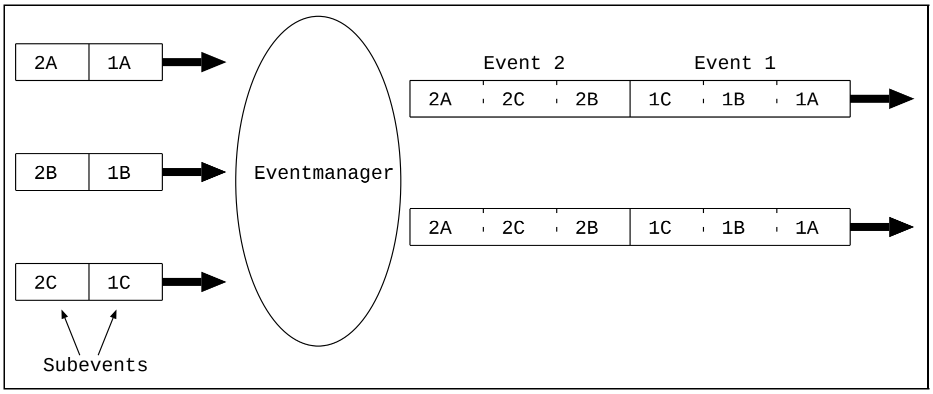

Abbildung 4.2: Der Eventmanager empfängt Subevents und setzt sie zu vollständigen Events zusammen.

zu jedem Trigger ein Subevent. Diese tragen bereits die Nummer des Events, zu dem sie gehören werden. Der Eventmanager sammelt nun die Subevents, die zu einem Event gehören, von den Crate-Controllern ein und setzt sie zu einem Event zusammen. Dieses wird allen Datenausgängen angeboten und bei Bedarf dort kurzzeitig zwischengespeichert, um ein Blockieren zu vermeiden (Abbildung 4.2).
EMS unterscheidet zwischen primären und sekundären Dataouts. Primäre Dataouts müssen alle Events verarbeiten, sekundäre Dataouts verarbeiten nur soviele Events, wie der empfangende Prozeß abnehmen kann. Ein Magnetbandgerät, das ja alle Experimentdaten speichern soll, wird normalerweise von einem primären Dataout bedient werden, ein Displayprogramm, das nur zur Kontrolle dient, ist dagegen mit einem sekundären Dataout verbunden, damit es die Datenaufnahme nicht unnötig verlangsamt.
Die Events werden (in der „alten" Version des Datenaufnahmesystems) streng sequentiell bearbeitet. Der Eventmanager setzt erst ein Event zusammen und leitet es an die Dataouts weiter, bevor er weitere Subevents von den Crate-Controllern empfängt. Er muß also für jedes Event mit jedem Crate-Controller einmal kommunizieren. Bei kleinen (im Extremfall leeren) Subevents und hohen Eventraten kann das einen erheblichen Verwaltungsaufwand (Overhead) mit entsprechenden Leistungseinbußen bedeuten.

4.5 Der Kommunikationsprozeß

Die Clients auf der Experiment-Workstation und die Server (VEDs) kommunizieren nicht direkt miteinander. Die gesamte Kommunikation läuft über einen speziellen Kommunikationsprozeß (Abbildung 4.3).
Ursprünglich existierte er wegen einer technischen Unzulänglichkeit des

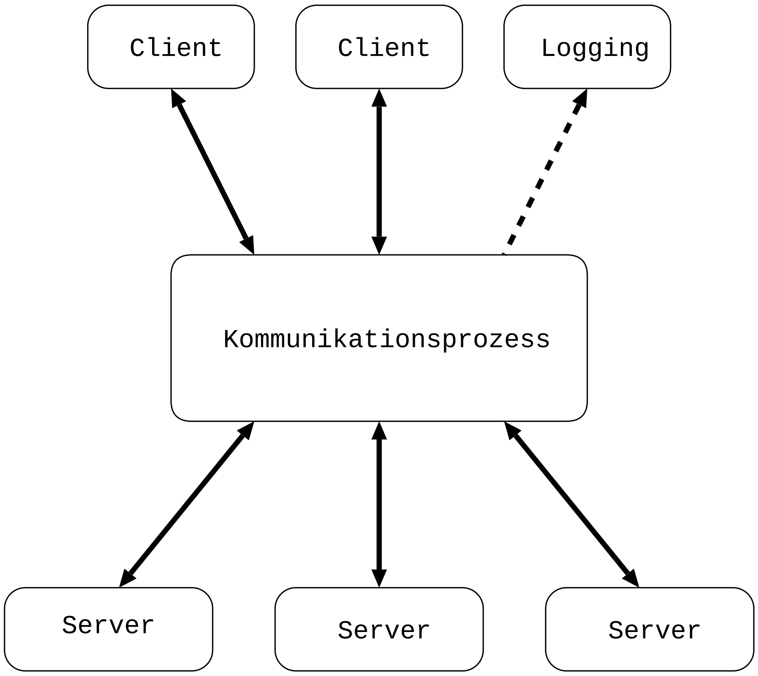

Abbildung 4.3: Position des Kommunikationsprozesses als Vermittler zwischen Clients und Servern

in den Front-End-Prozessoren verwendeten Betriebssystems OS–9: Es ist nur mit hohem Aufwand möglich, daß ein Prozeß unter OS–9 mehrere TCP-Verbindungen gleichzeitig zuverlässig verwaltet. Deshalb verbinden sich alle Clients mit dem Kommunikationsprozeß, der z.B. auf der Experimentworkstation läuft. Dieser wiederum ist mit jedem Server über eine einzige TCP-Verbindung verbunden.

Unabhängig davon bringt die Verwendung des Kommunikationsprozesses aber erhebliche Vorteile mit sich. Er ist eine zentrale Instanz für die Adreßverwaltung. Ein Client kennt nur einen logischen Namen für ein VED. Auf welche Art und Weise die Verbindung zum VED tatsächlich hergestellt wird, ist aus der Sicht des Clients unerheblich.

Da sämtliche Kommandos über den Kommunikationsprozeß geführt werden, ist dieser natürlich der ideale Punkt für eine Fehlersuche in der Kommunikation. Innerhalb des Kommunikationsprozesses existiert ein (recht rudimentäres) VED, mit Hilfe dessen lokaler Prozeduren man Informationen über die Verbindungen des Kommunikationsprozesses zu anderen VEDs und Clients abrufen kann. Dabei ist es möglich, Kopien von allen EMS-Kommandos und die Antworten darauf an einen speziellen (Debug-)Client schicken zu lassen, der diese dekodiert und z.B. in eine Datei schreibt. Dadurch können Fehler im logischen und zeitlichen Ablauf leicht gefunden werden.

Gleichzeitig könnte der Kommunikationsprozeß prüfen, ob ein bestimmter Client berechtigt ist, mit einem Server zu kommunizieren. Diese Möglichkeit ist bisher nicht realisiert worden, da eine vorsätzliche Störung nicht befürchtet werden muß und versehentliche Eingriffe von außen sehr unwahrscheinlich sind. Bei Experimenten mit höheren Sicherheitsanforderungen könnte der Kommunikationsprozeß aber leicht an diese Anforderungen angepaßt werden.

Kapitel 5

Das Datenaufnahmesystem an COSY–11

5.1 Hardware

Die Struktur des Datenaufnahmesystems von COSY–11 ist in Abbildung 5.1 gezeigt.
Die gesamte Steuerung erfolgt von der Workstation aus. Sie ist über das interne Ethernet des Forschungszentrums[1] mit dem weltweiten Internet verbunden. Über ein zweites Ethernet-Interface kommuniziert sie mit dem Eventbuilder und den Crate-Controllern.
Das VME-Crate, Eventbuilder-Crate genannt, enthält den eigentlichen Eventbuilder und zwei Subeventreader. Der Eventbuilder liest die Subeventreader über den VME-Bus aus und schreibt die Daten auf ein Magnetband. Gleichzeitig kann er einen Teil der Eventdaten über das Experimentnetz an die Workstation senden (Online-Display). Einer der Subeventreader ist über einen VICbus [ISO93] mit dem Fastbus-Controller verbunden, der andere mit zwei CAMAC-Controllern und einem Crate mit im ZEL[2] entwickelten Diskriminatoren [Joc92]. Diese Diskriminatoren und ein weiteres CAMAC-Crate, das einen Teil der Triggerlogik enthält, liefern während des Experimentes keine Daten, sie werden nur über VICbus bzw. Ethernet konfiguriert. Die Aufteilung des Datenstromes auf zwei VICbus-Stränge sollte eine Parallelarbeit der Subeventreader ermöglichen und dadurch einen Geschwindigkeitsgewinn mit sich bringen. Es zeigte sich jedoch, daß Datendurchsatz und maximale Eventrate durch andere Faktoren bestimmt werden [Dro96], so daß diese Anordnung eigentlich nur noch aus historischen Gründen so besteht, jedoch auch mit

[1]Das Netz des Forschungszentrums wird JuNet genannt, zur Zeit des Experimentes hieß es noch KFAnet.

[2]Zentrallabor für Elektronik des Forschungszentrums Jülich

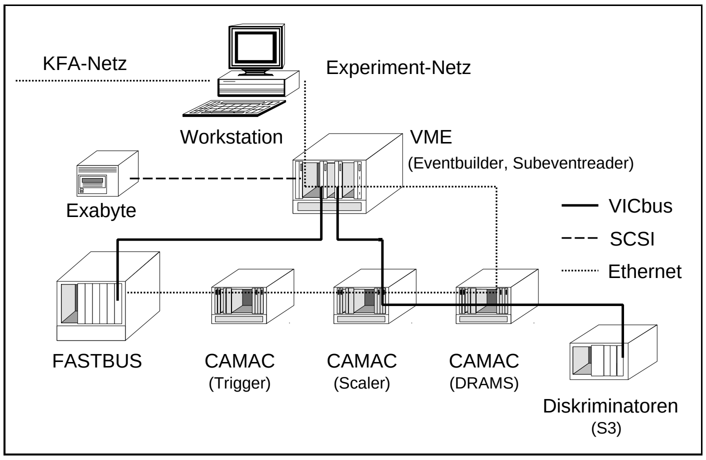

Abbildung 5.1: Struktur und Komponenten des Datenaufnahmesystems von COSY–11 in schematischer Darstellung.

keinerlei Nachteilen verbunden ist.

5.2 Zeitverhalten

5.2.1 Auslesezeit

Die Totzeit des Datenaufnahmesystems wird in erster Linie von der für die Auslese der einzelnen Digitalisierungsmodule benötigten Zeit bestimmt. Bei COSY–11 werden Eventdaten aus drei Crates ausgelesen, aus einem Fastbus-Crate und zwei CAMAC-Crates. Die Totzeit wird dabei natürlich durch das langsamste Crate bestimmt.
Eines der CAMAC-Crates enthält nur drei Scaler-Module und ein Eingaberegister und kann in etwa 150 μs ausgelesen werden.
Das andere CAMAC-Crate enthält die Digitalisierungsmodule für den Silizium-Pad-Detektor. Die Signale aller Silizium-Pads werden analog über zwei Koaxialkabel übertragen und nacheinander digitalisiert [Köh95]. Dadurch ist vor dem Auslesen eine Wartezeit von 900 μs notwendig. Eine Verringerung ist nur durch weitere Parallelisierung der Übertragung möglich, das aber würde einen (sehr aufwendigen) Ausbau des Siliziumdetektors aus dem Dipolmagneten erfordern und wird derzeitig nicht in Betracht gezogen. Dieses Problem war zur Zeit des Experimentaufbaus bereits bekannt, seine rechtzeitige Lösung scheiterte aber an der zusätzlich benötigten und damals nicht beschaffbaren Ausleseelektronik.
Die Auslesezeit des Fastbus-Crates wurde in [Wol97] ausführlich unter-

sucht und liegt je nach Verteilung der Daten auf die einzelnen Fastbus-Module zwischen 600 und 1100 μs.

Die maximale Gesamtdatenrate liegt derzeit bei 450 KByte/s, sie wird durch die Geschwindigkeit des verwendeten Magnetbandgerätes EXB–8500 der Firma EXABYTE [EXA90] begrenzt. Die Übertragungspfade zwischen Crate-Controller und Subeventreader (VICbus) sowie zwischen Subeventreader und Eventbuilder (VME) stellen damit keine Begrenzung dar.
Bei Erreichen dieser maximalen Datenrate werden alle Zwischenspeicher im Eventbuilder, Subeventreader und Crate-Controller gefüllt und es werden dann solange keine Trigger mehr akzeptiert, bis wieder ausreichend Speicher zur Verfügung steht. Dadurch steigt die mittlere Totzeit entsprechend. Abbildung 6.4 (Seite 54) zeigt, wie in einem solchen Fall die Verteilung der Totzeit aussehen kann. Die Werte wurden nicht an COSY–11, sondern an einem Testaufbau gemessen. Die Einzeltotzeit der meisten Events bleibt dabei unverändert, aber in größeren Abständen werden Pausen eingefügt, in denen nur Daten zum Eventbuilder transportiert werden.
Bei Verwendung eines schnelleren Bandgerätes würde die maximale Datenrate durch die begrenzte CPU-Leistung des Eventbuilders auf etwa 2 bis 3 MByte/s begrenzt werden.

Bei COSY–11 liegt die Eventgröße je nach Einstellung von Schwellen und Trigger bei 500 bis 1000 Byte und die mittlere Eventrate bei 50 bis 300 pro Sekunde. Damit stellt die maximale Datenrate zur Zeit kein Problem dar. Während die Auslesezeit der Silizium-Detektoren wegen deren Besonderheiten nur mit sehr hohem Aufwand reduziert werden kann, wäre die Auslesezeit des Fastbus-Systems z.B. durch Aufteilen der Module auf zwei Crates unter die genannten 600 μs auf etwa 400 μs reduzierbar. Gegenwärtig liegt die Totzeit der COSY–11-Datenaufnahme bei 900 bis 1100 μs.

5.2.2 Totzeit

Häufig wird als Totzeit die Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der ein angebotener Trigger nicht akzeptiert wird, weil die Datenaufnahme noch ein vorangegangenes Event bearbeitet. Diese Wahrscheinlichkeit ist gleich dem Verhältnis der „toten“ Zeit (der Zeit, in der das Datenaufnahmesystem seine Arbeit verrichtet) zur Gesamtzeit. Der Zusammenhang zwischen dieser *relativen Totzeit* und der im vorigen Kapitel angegebenen *absoluten Totzeit*, also eigentlich der Auslesezeit, soll hier untersucht werden.

Unter der Annahme einer konstanten mittleren Rate von Triggerimpulsen (R_T) und der (zeitlich) statistischen Unabhängigkeit der Trigger ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, daß ein Trigger abgewiesen wird (w_{dt}) als Produkt aus der Triggerrate, der (absoluten) Totzeit (t_{dt}) und der Wahrscheinlichkeit, daß ein Trigger nicht abgewiesen wird (w_a):

$$w_{dt} = R_T \cdot t_{dt} \cdot w_a \tag{5.1}$$

Aus $w_a + w_{dt} = 1$ folgt

$$w_{dt} = \frac{R_T \cdot t_{dt}}{1 + R_T \cdot t_{dt}} \tag{5.2}$$

Über die Verteilung der Abstände zwischen zwei Triggern ist ein anderer Zugang möglich. Diese Abstände genügen bei statistischer Unabhängigkeit einer Exponentialverteilung, deren Wahrscheinlichkeitsdichte durch

$$h(t) = a \cdot e^{-a \cdot t}\ ; \quad a, t > 0 \tag{5.3}$$

gegeben ist. Der Erwartungswert

$$\int_{t=0}^{\infty} h(t) \cdot t dt = \int_{t=0}^{\infty} a \cdot e^{-a \cdot t} \cdot t dt = \frac{1}{a} \tag{5.4}$$

entspricht dem Reziproken der mittleren Triggerrate: $a = R_T$.
Wenn man annimmt, daß alle Events, denen innerhalb der Totzeit t_{dt} ein anderes Event vorausgeht, nicht akzeptiert werden, erhält man für den Anteil nicht akzeptierter Events:

$$w_{dt} = \int_{t=0}^{t_{dt}} h(t) dt = 1 - e^{-R_T \cdot t_{dt}} \tag{5.5}$$

Dabei ist nicht berücksichtigt, daß vorangegangene Trigger selber in die Totzeit eines ihrer Vorgänger fallen können und damit ihrerseits keine Totzeit verursachen. Gleichung 5.5 kann damit nur eine Näherung sein.

Die Voraussetzung der statistischen Unabhängigkeit ist im realen Experiment meist nur näherungsweise gegeben. Oft wird der Gesamttrigger aus verschiedenen Anteilen gebildet, wobei Anteile von geringerem Interesse (z.B. Test neuer Detektorkomponenten) oder Anteile sehr hoher Zählrate (z.B. zur Luminositätsbestimmung über den vergleichsweise großen Wirkungsquerschnitt der elastischen Proton-Proton-Streuung) durch einen Vorteiler verringert werden. Diese vorgeteilten Trigger sind nicht mehr exponentialverteilt:

Bei einer Teilung durch zwei ist die Länge des Intervalls zwischen zwei Triggern gleich der Summe zweier aufeinanderfolgender Intervalle zwischen den originalen Triggern, die Wahrscheinlichkeitsdichte ergibt sich dabei aus einer Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichten für die Längen der beiden Originalintervalle:

$$w_2 = \int_{\tau=0}^{t} h(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau = a^2 \cdot t \cdot e^{-a \cdot t} \tag{5.6}$$

Bei einer N–fachen Vorteilung erhält man durch wiederholte Faltung

$$w_N = \frac{a^N}{(N-1)!} \cdot t^{N-1} \cdot e^{-a \cdot t} \tag{5.7}$$

Die Verteilung für N=4 sind in Abbildung 5.2 der ursprünglichen Exponentialverteilung gegenübergestellt. Bei großen N kann man dabei näherungsweise von einer Gaußverteilung mit dem Mittelwert $\frac{N}{R_T}$ ausgehen (zentraler Grenzwertsatz).

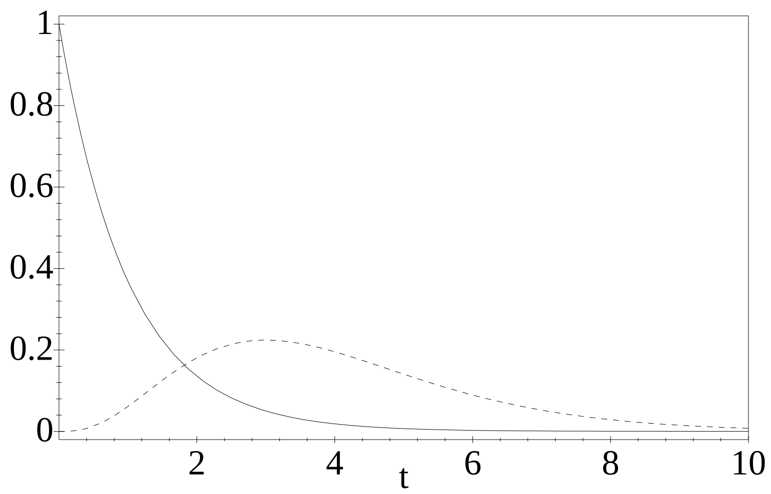

Abbildung 5.2: Verteilung der Intervallängen zwischen aufeinanderfolgenden Triggern (durchgehende Linie: statistisch unabhängig; gestrichelte Linie: um den Faktor 4 vorgeteilt)

In der Praxis setzt sich der Gesamt-Trigger aus mehreren unterschiedlich verteilten Komponenten zusammen, eine geschlossene Behandlung ist

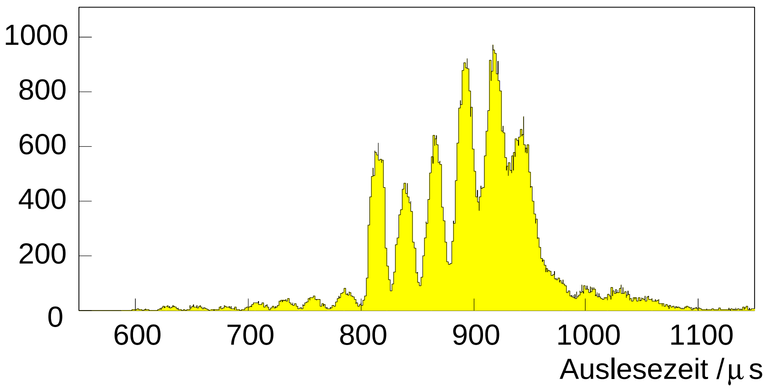

Abbildung 5.3: Typische Verteilung der Auslesezeit des Fastbus-Systems von COSY–11 [Wol97]

daher schwierig.
Erschwerend kommt hinzu, daß die Auslesezeit entgegen der bisherigen Annahme keine Konstante ist, sondern sich von Event zu Event ändern kann, wie Abbildung 5.3 deutlich zeigt. Es ist eine typische Verteilung der Auslesezeiten des Fastbussystems von COSY–11 [Wol97]. Bei jedem Event haben nur wenige Kanäle Signale, die die eingestellten Schwellen übersteigen. Diese Kanäle verteilen sich unterschiedlich auf die Fastbus-Module. Nur die Module, die tatsächlich Daten enthalten, werden ausgelesen. Da die Auslesezeit pro Modul etwa 26 μs beträgt, ist die Totzeit stark von der Zahl der auszulesenden Module abhängig. Bei einer mittleren Totzeit von etwa 900 μs und einer angenommenen Triggerrate von 500/s würde das nach Gleichung 5.2 zu einer relativen Totzeit von 31 % führen.

Kapitel 6

Das neue Datenaufnahmesystem

6.1 Motivation

In mehreren Experimenten wird EMS erfolgreich eingesetzt. Wenn ein neues Experiment mit einem Datenerfassungssystem ausgestattet werden soll, ist Gelegenheit, darüber nachzudenken, ob gesammelte Erfahrungen und die Weiterentwicklung der verfügbaren Technik einige Veränderungen rechtfertigen. Auch kann man davon ausgehen, daß ein neues Experiment höhere Anforderungen stellen wird.

Es zeigte sich, daß das Grundkonzept immer noch gut ist, daß aber einige Details verbesserungswürdig sind. Da alle modernen Digitalisierungsmodule Meßwerte unterhalb einer einstellbaren Schwelle unterdrücken können und an COSY nur Reaktionen mit einigen wenigen Teilchen im Ausgangskanal untersucht werden sollen, wurde davon ausgegangen, daß die Eventgrößen wie bisher zwischen einigen hundert Byte und nicht mehr als etwa fünf KByte liegen werden.
Jedoch ist es bei komplexen Experimenten immer komplizierter, die eigentlich interessanten Events schon durch den Trigger zu selektieren, die maximale Eventrate kann eigentlich nie hoch genug sein. Natürlich sind dem technisch und finanziell Grenzen gesetzt, so daß eine Eventrate von einigen tausend pro Sekunde als brauchbarer Kompromiß akzeptiert werden muß.
Daraus ergibt sich die Forderung nach einer maximalen Totzeit (= Auslesezeit pro Event) in der Größenordnung von 100 μs.

6.2 Hardware

Wegen der rasanten Entwicklung auf dem Gebiet der Prozessoren bietet es sich an, hier nach Verbesserungsmöglichkeiten zu suchen.

Bisher werden VME-Computer und „intelligente[1]“ CAMAC- und Fastbus-Controller mit Motorola-Prozessoren eingesetzt. Als Betriebssystem wird OS–9 verwendet. Da diese Controller und VME-Bords nur in geringen Stückzahlen produziert werden, sind sie relativ teuer (ca. 20000 DM) und entsprechen häufig nicht der aktuellen Prozessortechnologie.
Auch ist OS–9 im Gegensatz zu anderen Betriebssystemen wie z.B. Unix recht unbekannt und deswegen für Anwender, die nur kleine Änderungen an vorhandener Software vornehmen müssen, zumindest unpraktikabel.
Ziel der Änderungen war es daher, einen Rechner einzusetzen, der problemlos von neuen Prozessorentwicklungen profitieren kann, zusammen mit einem weiter verbreiteten Betriebssystem, das sich schnell an die sich wandelnde Prozessortechnologie anpassen läßt.

Als „billiger Massenprozessor“ bot sich dabei der Intel-Pentium an, in der Hoffnung, daß, wie durch die Geschäftspolitik der Fa. Intel üblich, bei Weiterentwicklungen die Kompatibilität gewahrt bleibt.
Gleichzeitig sollte der Rechner PC[2]-kompatibel sein, einerseits um Standard-Betriebssysteme ohne Anpassung verwenden zu können, andererseits um von der Vielfalt am Markt verfügbarer Peripherie-Bausteine profitieren zu können.

Die Auswahl an Unix-kompatiblen Betriebssystemen für Intel-Prozessoren[3] ist groß, so daß man sich dabei nicht unwiderruflich festlegen muß. Auswahlkriterien sind dabei:

Bekanntheit und **Verbreitung**, um Einarbeitungszeiten bei neuen Anwendern zu vermeiden.

Offenheit, um Treiber für eigene Hardware ergänzen zu können. Nicht unumgänglich aber von großem Vorteil ist dafür die Verfügbarkeit des Quellcodes des Betriebssystems.

Geringe oder nicht vorhandene **Lizenzkosten**, um unproblematisch über neue Betriebssystemversionen für neue Hardware verfügen zu können.

Um außerdem beim Einsatz eines neuen Prozessors nicht den ganzen PC austauschen zu müssen, ist der Einsatz sogenannter passiver Backplanes vorzuziehen. Dabei befindet sich der Prozessor zusammen mit dem Speicher und einigen wichtigen peripheren Schaltkreisen auf einer Steckkarte, die auf die Backplane aufgesteckt wird.

[1] „Intelligent“ soll besagen, daß der Controller über einen eigenen Prozessor verfügt.
[2] **P**ersonal **C**omputer (persönlicher Rechner)
[3] Wenn im weiteren von Intel-Prozessoren die Rede ist, sind immer 80x86, Pentium und Nachfolger gemeint.

Aus Gründen der mechanischen und elektrischen Zuverlässigkeit wäre eigentlich Compact-PCI[4] [PCI95a] die ideale Lösung, jedoch sind dafür noch relativ wenige Module auf dem Markt verfügbar. Auch ist es möglich, daß wegen der Abkopplung vom Massenmarkt der Preisvorteil gegenüber auf VME basierenden Lösungen wieder verlorengeht.

Alle neu zu entwerfenden Peripheriebausteine sollen den PCI-Bus verwenden. Er läßt eine Kompatibilität zu den PCs der nächsten Jahre erwarten[5]. Durch ein einfaches Redesign ist dadurch auch ein komplikationsloser Übergang auf Compact-PCI möglich.

Als Eventmanager sollte man also (fast) jeden Personal Computer (PC) verwenden können, jedoch sind keine CAMAC- und Fastbus-Controller mit Pentium bekannt. Das folgende Kapitel zeigt, daß das dennoch kein Hinderungsgrund ist.

6.2.1 Der CAMAC-Controller

Den bisher verwendeten „intelligenten" CAMAC-Controllern lag die Idee zugrunde, daß man am schnellsten auf die Hardware zugreifen kann, wenn sich der Prozessor möglichst nahe am CAMAC-Datenweg befindet.

Eine andere Lösung ist ein „dummer" Controller, der eigentlich aus zwei Teilen besteht: Einerseits ein CAMAC-Modul, das im Grunde nur ein paar Treiber beinhaltet, andererseits ein Interface für einen Peripherie-Bus eines beliebigen Computers. Beide Teile sind über ein mehr oder minder langes Kabel verbunden. Derartige Controller sind in verschiedenen Varianten auf dem Markt. Sie leiden aber eben daran, daß ein langes Kabel schnelle CAMAC-Zugriffe verhindert. Auch sind im Zusammenhang mit PCs sind zur Zeit nur Controller verfügbar, die den inzwischen veralteten ISA-Bus verwenden.
Eine grundsätzliche Beschränkung der Geschwindigkeit liegt in der Tatsache, daß bei aktuell im Einsatz befindlicher Hardware ein Standard-CAMAC-Zyklus 1.2 μs dauert. Der Datendurchsatz ist damit auf etwa 2.5 MByte pro Sekunde begrenzt. Das scheint mehr als ausreichend zu sein, jedoch ist zu beachten, daß die Daten nicht kontinuierlich, sondern nur in der „Totzeit" zwischen zwei Events ausgelesen werden.
Da viele moderne CAMAC-Module über ein FERA-Interface[6] verfügen, bietet sich folgende Lösung an: Ein Controller, der die Daten direkt vom

[4] **P**eripheral **C**omponent **I**nterface [PCI95]

[5] Die Lebensdauer eines Bus-Systems kann niemand voraussagen, die breite Verwendung des PCI-Busses gibt aber eine gewisse Sicherheit.

[6] **F**ast **E**ncoding and **R**eadout **A**DC der Firma LeCroy [LeC]

FERA-Bus liest und unbesehen über DMA[7] zu einem Rechner weiterleitet, ist weder von der Dauer eines CAMAC-Zyklusses noch von den Einschränkungen durch ein längeres Kabel abhängig.

Moderne PCs haben einen PCI-Bus, für den diverse Interface-Schaltkreise auf dem Markt sind, so daß ein CAMAC-Controller mit PCI-Interface heute mit nur wenigen (programmierbaren) Schaltkreisen realisierbar ist. Im ZEL wurde ein solcher Controller entwickelt [Erv97b]. Er genügt zusätzlich dem Level 1 der (vorläufigen) Fast-CAMAC-Spezifikation [Daw97], der Übertragungsraten von 7.5 MByte/s erlaubt.

Die FERA-Auslese wird unabhängig von der Software des Computers gestartet, die Daten werden direkt in den Speicher des PC geschrieben. Die (wegen der Interruptbehandlung) etwas später gestartete Software findet in den meisten Fällen die Daten bereits komplett im Speicher vor, so daß die Totzeit nur durch die Software bestimmt wird.
Gleichzeitig erlaubt dieser Controller unter bestimmten Umständen, zusammen mit einem neuen Synchronisationsmodul (Kapitel 6.2.3), mehrere Events hintereinander ohne Softwareeingriff auszulesen.

6.2.2 Der Fastbus-Controller

Als Fastbus-Controller wird ein SFI-340 der Firma Struck [STR97] verwendet. Es handelt sich dabei um einen Controller ohne Prozessor, der zwei VME-Slots besitzt. Diese Slots könnte man mit einer VME-CPU bestücken, der Fastbus-Controller erscheint dabei als VME-Slave. Ein wesentliches Ziel war aber gerade die Vermeidung von VME-CPUs (Kapitel 6.2).

Als Alternative bot sich die VME-PCI-Kopplung „Model 617" der Firma Bit 3 an [Bit3]. Dadurch kann der Prozessor des PC indirekt über diese VME-PCI-Kopplung (hier Bit 3-Interface genannt) auf den VME-Slave-Adreßbereich des Fastbus-Controllers zugreifen, Daten können direkt vom Fastbus-Controller mit Hilfe seines DMA-Controllers ohne Mithilfe eines Prozessors in den Speicher des PC geschrieben werden.

Der Fastbus-Controller beinhaltet einen einfachen Sequenzer, der in der Lage ist, vorbereitete Abfolgen von Fastbus-Zugriffen auszuführen. Er kann jedoch nicht auf die ausgelesenen Daten reagieren und logische Entscheidungen treffen. Der Sequenzer wird von einem Signal (Trigger) direkt ohne Softwareeingriff gestartet, so daß die Software wieder nur die

[7] **D**irect **M**emory **A**ccess (direkter Speicherzugriff)

bereits im Speicher des PC abgelegten Daten verarbeiten muß. Dieses Konzept ist allerdings nur anwendbar, wenn die Auslese eines kompletten Events vom Sequenzer erledigt werden kann. Bei dem vorgesehenen Einsatz von Fastbus-Modulen der Firma Phillips-Scientific mit Multiblock-Readout ist das gegeben.

Wegen der technischen Beschränkungen des Bit 3-Interfaces ist eine Datenrate von maximal 12 MByte/s möglich. Bei Verwendung der internen DMA-Einrichtung des Bit 3-Interfaces wären 20 MByte/s erreichbar, die Logik des SFI-340 läßt dies aber nicht zu.

6.2.3 Das Synchronisations- und Diagnose-Modul

Das im Kapitel 4.3 erwähnte Synchronisationsmodul wurde den Anforderungen nicht mehr gerecht. Einerseits wurde der Triggerimpuls um $\approx$ 100 ns verzögert, bevor er als Gate für TDCs und ADCs zur Verfügung steht, andererseits war der Synchronisationsbus auf maximal 50 Meter begrenzt und schon unterhalb dieser Länge nicht immer zuverlässig. Außerdem soll das Synchronisationsmodul auf möglichst direktem Weg vom Prozessor erreichbar sein. Da der Prozessor nun nicht mehr im eigentlichen Controller ist, bot es sich an, ein PCI-Modul zu entwickeln. Gleichzeitig wurde die Gelegenheit genutzt, umfangreiche Diagnosemöglichkeiten vorzusehen [Erv97a].
Während bisher unterschiedliche Module für CAMAC, Fastbus und VME notwendig waren, erlaubt die Verwendung des PCI-Busses in allen Rechnern die Beschränkung auf einen einzigen Modultyp.

Das realisierte Grundprinzip ist das gleiche wie bei dem Modul der GSI Darmstadt [Ess92]. Ein Modul ist Master, nur dieses verfügt über Ein- und Ausgänge für die Trigger. Es sind vier unabhängige Trigger möglich, die durch ein logisches OR verknüpft sind. Alle vier Trigger stehen auch einzeln als Ausgänge zur Verfügung, so daß es möglich ist, die Detektoren des Experimentes in mehrere Gruppen einzuteilen, die unabhängig voneinander getriggert werden können. Die Zeit zwischen Triggereingang und Ausgabe eines akzeptierten Triggers liegt bei etwa einer Nanosekunde.
Es ist möglich, ein Trigger-Akzeptanz-Fenster von 15 bis 130 ns einzuschalten, dann werden nach einem ersten Trigger weitere Trigger von anderen Eingängen innerhalb dieser Zeit akzeptiert. So sind 15 verschiedene Triggerkombinationen möglich, auf die die Software jeweils unterschiedlich reagieren kann.
Der vierte Triggereingang kann in einem „Latch-Modus“ betrieben werden. Es ist oft wünschenswert, in größeren Zeitabständen spezielle Trigger

auszulösen, um z.B. Scaler zwischen den einzelnen Beschleunigungszyklen von COSY auszulesen. Solche Trigger dürfen nicht dadurch verloren gehen, daß sie in die Totzeit eines anderen Triggers fallen, jedoch ist der genaue Zeitpunkt ihres Auftretens nicht wichtig. Im Latch-Modus wird der vierte Trigger gespeichert, wenn er während einer Totzeit auftritt, und sofort im Anschluß daran bearbeitet.

Außer dem Master sind alle anderen Module Slaves, sie sind mit dem Master über einen Synchronisations-Ring verbunden. Dieser Ring besteht aus Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen den Modulen, jedes Modul ist mit seinen zwei Nachbarn verbunden. Dadurch ist für die elektrische Funktionsfähigkeit nicht mehr die Gesamtlänge (wie bei den GSI-Modulen), sondern nur noch der Abstand zwischen zwei Modulen entscheidend. Bei einer Übertragung der Signale über Twisted-Pair-Kabel kann dieser Abstand bis zu 50 Meter betragen, getestet wurde er bisher mit 35 Meter. Durch eine optische Übertragung kann theoretisch eine Entfernung von mehreren Kilometern überbrückt werden. In erster Linie dient eine solche Übertragung aber der elektrischen Entkopplung der einzelnen Controller und damit der Vermeidung von Störungen (Erdschleifen). Dafür bot sich der Optobus von Motorola an, der die parallele Übertragung von zehn digitalen Signalen auf einfache Weise erlaubt. Die Produktion der Optobus-Schaltkreise wurde jedoch nur wenige Monate nach ihrer Einführung eingestellt. Eine Alternative wird PAROLI[8] von Siemens sein [Siem98]. Sein Einsatz ist allerdings erst nach einem teilweisen Redesign des Synchronisations- und Diagnose-Moduls möglich.

Jedes Modul enthält einen Eventzähler mit einer Breite von 32 Bit, die drei niederwertigsten Bits werden über den Synchronisations-Ring übertragen und in jeder angeschlossenen Station verglichen. Durch die Verwendung eines Ringes statt eines Busses kann auch der Master die Informationen, die er selbst auf den Ring gelegt hat, wieder lesen und Übertragungsfehler feststellen.

Jedes Modul kann die durch den ihm zugeordneten Prozessor beim Auslesen der Digitalisierungsmodule verursachte Totzeit mit einer Auflösung von 100 ns messen. Dazu besitzt es einen mit 10 MHz getakteten Zähler, der bei Empfang eines Triggers auf Null gesetzt wird. Nach dem Readout der Eventdaten kann der Prozessor diesen Zähler auslesen. Im Master wird der Zählerinhalt am Ende der gesamten Totzeit in ein Register kopiert, so daß auch die Totzeit des Gesamtsystems bekannt ist. Dadurch ist es leicht möglich, festzustellen, welches Crate die größte Tot-

[8] **PAR**allel **O**ptical **LI**nk for high-speed data transmission

zeit verursacht, um gezielt Optimierungen vornehmen zu können.

Zusätzlich werden im Master die Trigger gezählt, die in eine Totzeit fallen und abgewiesen werden. Daraus und aus der Anzahl der akzeptierten Trigger, die durch den Eventcounter gezählt werden, kann die „relative Totzeit", siehe Kapitel 5.2.2, abgeleitet werden.

Um die Verteilung der Intervalle zwischen den Triggern bestimmen zu können, werden vom Master die Zeiten zwischen aufeinanderfolgenden Triggern (unabhängig davon, ob sie akzeptiert werden oder nicht) auch mit einer Auflösung von 100 ns gemessen und gespeichert. Diese Verteilung sollte normalerweise einer Exponentialverteilung entsprechen (Gleichung 5.3, Seite 36), die in Abbildung 5.2 gezeigten Einflüsse von vorgeteilten Triggeranteilen sollten in den meisten Experimenten vernachlässigbar sein. Aus dieser Verteilung kann man Hinweise auf eine eventuelle fehlerhafte Arbeitsweise des Triggers (z.B. Doppeltrigger, die durch Reflexionen entstehen) entnehmen.

Zusammenfassend bietet das neue Synchronisations- und Diagnose-Modul gegenüber der bisherigen Lösung folgende Vorteile:

- minimale Verzögerung des Triggerimpulses
- Verfügbarkeit von vier unterschiedlichen Triggerausgängen
- Umfangreiche Diagnosemöglichkeiten wie Zählung der abgewiesenen Trigger, Totzeitmesung und Messung der Triggerverteilung.

6.3 Software

Da schon bei der Programmierung der Serverprogramme für die erste Version von EMS auf Modularität und Portierbarkeit geachtet wurde, waren eigentlich nur geringe Änderungen nötig. Einzig für die neue Hardware mußten natürlich neue Treiber und Bibliotheksfunktionen erstellt werden.

Die Datenübertragung zwischen Crate-Controller und Eventbuilder wurde jedoch überarbeitet. Da moderne Prozessoren und Betriebssysteme ausreichende Geschwindigkeitsreserven haben, wurde auf die Verwendung von Spezialbussen, wie z.B. VICbus verzichtet. Statt dessen kann TCP/IP über Ethernet verwendet werden. Bei den in nächster Zukunft zu erwartenden Datenraten ist Fast-Ethernet (100 MBit/s) ausreichend.

Es wurde davon abgegangen, daß der Eventbuilder die empfangenen Subevents zu Events zusammensetzt, denn das bedingt, wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, daß alle Subevents, und seien sie noch so klein, einzeln transportiert werden müssen. Der Verwaltungs-Overhead pro Subevent ist aber von der Größe der Subevents prinzipiell unabhängig.

Um dieses Problem zu umgehen, wurde das folgende *Cluster*-Konzept entwickelt: Jeder Crate-Controller sammelt Subevents, bis eine bestimmte Grenze, z.B. 64 KByte, erreicht ist. Diese Subevents schickt er, zusammen mit einigen Verwaltungsdaten, als Cluster zum Eventbuilder. Dieser schreibt die Cluster ohne weitere Verarbeitung auf das Magnetband. Natürlich müssen für die Analyse die Subevents wieder sortiert werden, aber dann kommt es nicht mehr so sehr auf das Zeitverhalten an.

Ein Problem bleibt dabei die Online-Darstellung. Auch dafür werden komplette Events gebraucht. Bei niedrigen Eventraten kann der Eventbuilder einen Teil der Events sortieren und zu einem Display-Prozeß auf einem anderen Rechner schicken. Es ist jedoch nicht möglich zu garantieren, daß er alle Events sortieren kann: Wenn man von zwei Crate-Controllern ausgeht, die beide Subeventcluster von 64 KByte erzeugen, ein Crate-Controller aber Subevents von fast 64 KByte Länge, der andere Subevents von 64 Byte, dann enthält ein Cluster des ersten Crate-Controllers immer nur ein Subevent, ein Cluster des zweiten jedoch 1024. Der Eventbuilder muß also 1024 Cluster des ersten Crate-Controllers zwischenspeichern, während er auf das Cluster des zweiten Crate-Controllers wartet. Es sind also, zusätzlich zu dem vom Betriebssystem und dem „normalen" Teil des Datenaufnahmeprogrammes beanspruchten Speicherplatz, weitere 64 MByte Speicher notwendig. Dies übersteigt jedoch die technischen Grenzen der meisten preiswerten PC-Chipsätze.
Eine andere Möglichkeit ist es, alle Cluster nicht nur auf Magnetband zu schreiben, sondern auch einer Workstation über Ethernet zur Verfügung zu stellen, die unter Nutzung ihrer größeren Resourcen diese Aufgabe besser erledigen kann. Das ist der Weg, der derzeit beschritten wird.

Außerdem ist es denkbar, einem Crate-Controller zu erlauben, bereits unvollständig gefüllte Cluster abzusenden, was aber voraussetzt, daß die Größenverhältnisse der Subevents bekannt sind und sich nur wenig ändern.

6.4 Testmessungen

6.4.1 Testaufbau

Um einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit des veränderten Systems zu bekommen, wurden einige Messungen mit verschiedenen Testsystemen vorgenommen, an denen die wesentlichen Daten bestimmt werden konnten, ohne daß die Datenaufnahme in ihrer endgültigen Komplexität am Experiment nachgebildet werden mußte. Insbesondere sollte auch die Hardware erst nach der Bestätigung ihrer Tauglichkeit in größerem Umfang beschafft werden.

Zur Verfügung standen PCs unterschiedlicher Bauart, alle aber mit Pentium-Prozessoren, Alpha-Worstations von DEC (Digital Equipement Corporation), ein CAMAC-Crate mit dem neuen CAMAC-FERA-Controller des ZEL und ein Fastbus-Crate mit Controller STR340 und einer VME-PCI-Kopplung (Model 617 von Bit 3). Für den Datentransport zwischen den Rechnern wurde Ethernet (10Base-T) und Fast-Ethernet (100Base-T) mit einem Ethernetswitch LMS2F8-MA (Firma Lantronix, Irvine, California) mit acht Ethernet- und zwei Fast-Ethernet-Ports eingesetzt. Als Massenspeicher fand ein Digital Linear Tape (DLT 4000 von Quantum) Verwendung.

Je nach Bedarf wurden verschiedene Konfigurationen zusammengesetzt, um den Einfluß einzelner Komponenten möglichst unabhängig von anderen untersuchen zu können.

6.4.2 Messungen

Der Weg der Eventdaten kann grob folgendermaßen eingeteilt werden: Auslesen der Daten aus den Digitalisierungsmodulen, Transport vom Crate-Controller zum Eventbuilder, Schreiben der Daten auf einen Datenträger (Magnetband).
Für die Totzeit ist in erster Linie der erste Teil, das Auslesen aus den Digitalisierungsmodulen zusammen mit der unvermeidbaren Verwaltungsarbeit im Crate-Controller entscheidend. Der Datentransport zu Eventbuilder und Magnetbandgerät wird erst interessant, wenn die mittlere Datenrate, also das Produkt aus Eventgröße und Eventrate, die maximale Datenrate dieser Transportwege erreicht. In diesem Fall wird nach dem eigentlichen Auslesen vom Crate-Controller eine Pause erzwungen, in der auf ausreichend freien Speicherplatz für das nächste Event gewartet wird.

Um diese einzelnen Zeiten und Beschränkungen messen zu können, wurden nacheinander verschiedene Testaufbauten realisiert, bei denen alle im Moment nicht untersuchten Einflüsse weitgehend unterdrückt wurden.

Im Einzelnen wurden folgende Komponenten der Datenauslese und Datenübertragung untersucht:
Fastbus-Auslese:
Als Datenquelle wurde ein Testmodul der Firma Struck (STR 179) verwendet. Mit einem Blocktransfer-Befehl wurden Daten in Blöcken von 2 KByte über Controller und VME-PCI-Kopplung in den PC-Speicher geschrieben. Die Zeit pro Block wurde mit einem VME-Analysator gemessen. Eine Übertragungsrate von 12 MByte/s wird erreicht, wobei laut technischer Spezifikation des VME-PCI-Kopplers mehr auch nicht möglich ist. Abhängigkeiten von der verwendeten PC-Hardware treten nicht auf, Softwareeinflüsse sind auf Grund des Meßverfahrens nicht möglich.

CAMAC-Auslese:
Der FERA-Teil des CAMAC-Controllers war zum Zeitpunkt der Messung noch nicht voll funktionsfähig, vorläufige Test lassen eine Datenrate von 8 MByte/s erwarten.
Totzeit:
Während die vorigen Tests nur den Hardwareanteil der Auslesezeit und damit der Totzeit betreffen, wird hier der reine Softwareanteil untersucht. Der Programmablauf bei der Bearbeitung eines Events kann in folgende Phasen eingeteilt werden:

- Interrupt
  Ein Trigger wird dem Prozessor mit Hilfe des Synchronisations-Moduls als Interrupt gemeldet. Das Betriebssystem stellt die Interruptquelle fest und aktiviert das zuständige Programm (hier der EMS-Server) durch ein Softwaresignal. Je nach Betriebssystem vergehen dabei einige Mikrosekunden, bevor die eigentliche Arbeit beginnen kann. Im Gegensatz zu der „alten“ Version von EMS kann hier die Software das Synchronisations-Modul nicht ununterbrochen abfragen, da das Betriebssystem in den Pausen zwischen den Events andere Aufgaben erfüllen muß, in erster Linie den Datentransport über Ethernet. Da das Auslesen der Hardware aber unabhängig von der Software gestartet wird, laufen Interruptbearbeitung und Auslese zum Teil parallel.

- Event–Overhead
  Die Flexibilität von EMS wird erreicht, indem alle für die Eventauslese erforderlichen Aktionen durch Tabellen gesteuert werden.

Aus EMS-Sicht sind das Domains, Instrumentierungssysteme und Readoutprozedurlisten. Eine erhebliche Verwaltungszeit ist nicht vermeidbar. Der Event-Overhead ist der Anteil, der unabhängig von der Zahl der Instrumentierungssysteme verbraucht wird. Dazu gehört eigentlich auch die Interruptbearbeitung, aber wegen der unterschiedlichen Ursachen muß man versuchen, diese Zeiten getrennt zu messen.

- Event–Auslese
  Diese Zeit kann weiter unterteilt werden, es gibt einen Overhead pro Instrumentierungssystem (IS-Overhead) und, innerhalb der Bearbeitung eines Instrumentierungssystems, einen Overhead pro Readoutprozedur (Prozedur-Overhead) und die Zeit für die Readoutprozeduren selbst. Da die Readoutprozeduren speziell auf die auszulesende Hardware abgestimmt sind, können sie nicht allgemein untersucht werden, es wurden hier leere Prozedurrümpfe verwendet.

- Datentransport
  Es wird eine gewisse Zeit für die Verwaltung der internen Datenpuffer benötigt, die aber durch einfache Messungen nicht von dem Event-Overhead zu trennen ist. Die eigentliche Transportarbeit, also die Abarbeitung des TCP/IP-Protokolls, erledigt das Betriebssystem zwischen den einzelnen Events. Die Totzeit wird erst dann vergrößert, wenn infolge sehr großer Events oder hoher Eventraten die Leistungsgrenze des Ethernet oder des Prozessors erreicht wird.

Event-Overhead, IS-Overhead und Prozedur-Overhead wurden mit Hilfe des Synchronisations-und Diagnosemoduls gemessen, indem der Zeitzähler an passenden Stellen der Software ausgelesen wurde. Dabei werden die Meßergebnisse natürlich durch die Messung selbst beeinflußt. Im Fall des IS- und des Prozedur-Overheads kann dieser Einfluß eliminiert werden, der Event-Overhead wird um wenige Mikrosekunden vergrößert.
Es wurde folgendes Verfahren angewendet: In einem VED wurde ein Instrumentierungssystem mit einer Prozedur konfiguriert, diese Prozedur schreibt die aus dem Synchronisationsmodul ausgelesenen Zeitdaten in den Eventdatenstrom. Die Eventdaten werden über eine TCP-Verbindung zu einem Hilfsprozeß (auf einem anderen Rechner) transportiert, der sie in ein File schreibt. Die Triggerrate muß gering sein ($\approx 1000/s$), um einen Einfluß des Datentransports auf die Totzeit auszuschließen.
Es wurden Messungen mit verschiedenen Anzahlen von Readoutprozeduren gemacht. Zwischen der Totzeit und der Zahl der Readoutprozeduren besteht ein linearer Zusammenhang, so daß die Zeit ohne Readoutprozedur berechnet werden kann (Tabelle 6.1). Weiter wurden Messungen mit

N_P	10	100	1000	10000
$T_R[\mu s]$	81.4	98.03	298.9	2460.0

Tabelle 6.1: Auslesezeit (T_R) in Abhängigkeit von der Zahl der Readoutprozeduren (N_P).

verschiedenen Anzahlen von Instrumentierungssystemen ohne Readoutprozeduren gemacht, auch hier gibt es eine lineare Abhängigkeit (Tabelle 6.2). Bei mehreren Instrumentierungssystemen und mehreren Readout-

N_{IS}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_R[\mu s]$	71.6	72.0	73.0	73.4	74.4	75.4	76.7	74.5	77.4

Tabelle 6.2: Auslesezeit (T_R) in Abhängigkeit von der Zahl der Instrumentierungssysteme (N_{IS}).

prozeduren sollte die Aufteilung der Prozeduren auf die Instrumentierungssysteme keinen Einfluß haben, dies wurde an Stichproben bestätigt. Aus diesen Messungen ergibt sich

- ein Event-Overhead von 70.6 μs;
- ein IS-Overhead von 0.79 μs;
- ein Prozedur-Overhead von 0.24 μs.

Um den Event-Overhead genauer zu untersuchen, wurden an wichtigen Stellen im Softwareablauf Zwischenzeiten gemessen. Wegen der möglichen Konkurrenz verschiedener Prozesse und der Abläufe im Kernel selbst ist das Zeitverhalten von Multitasking-Betriebssystemen nicht deterministisch. Daher wurde für jeden Punkt ein Zeitspektrum aufgenommen, aus dem sich auch unterschiedliche Verhaltensweisen der einzelnen Betriebssysteme ableiten lassen.

Es wurden die Betriebssysteme NetBSD 1.2 (Abb. 6.1), Linux 2.0 (Abb. 6.2) und LynxOS 2.4 (Abb. 6.3) verwendet. LynxOS ist ein Echtzeitbetriebssystem, aber bei den hier auftretenden kurzen Zeiten kommen die abweichenden Prozeßverwaltungsalgorithmen nicht zum Tragen, so daß das Zeitverhalten genau wie bei den anderen Betriebssystemen nicht deterministisch ist.
Der Beginn der Zeitmessung ist der Zeitpunkt, zu dem das Synchronisationsmodul den Trigger an einem seiner Eingänge erkennt.
Folgende vier Zeiten wurden gemessen:

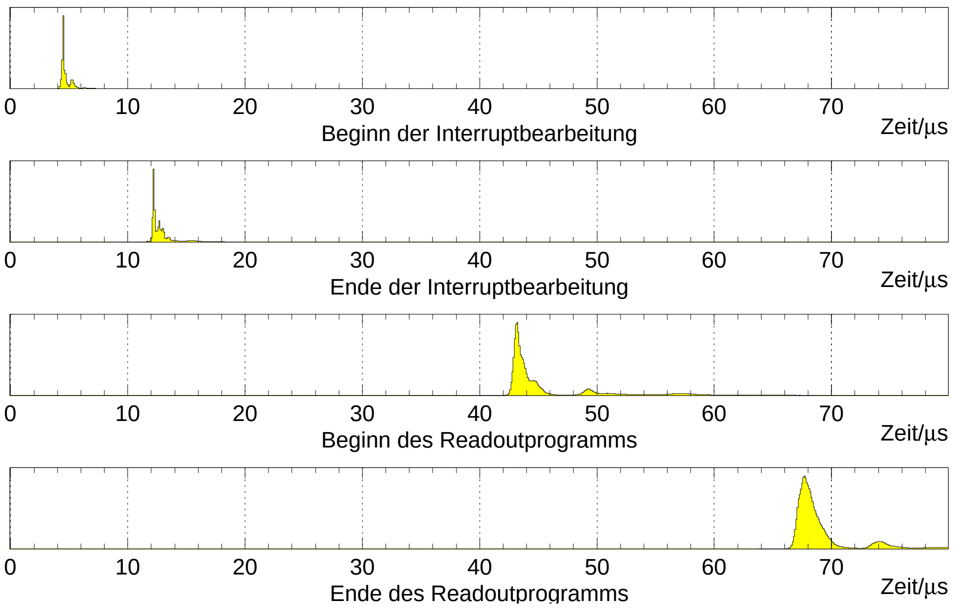

Abbildung 6.1: Zeitspektrum wichtiger Punkte bei der Eventauslese mit NetBSD 1.2

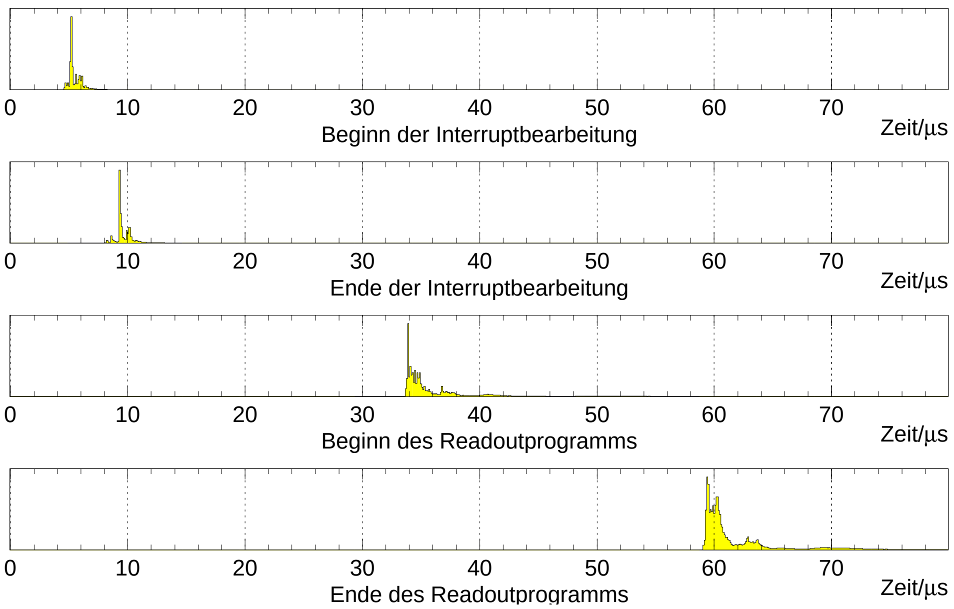

Abbildung 6.2: Zeitspektrum wichtiger Punkte bei der Eventauslese mit Linux 2.0

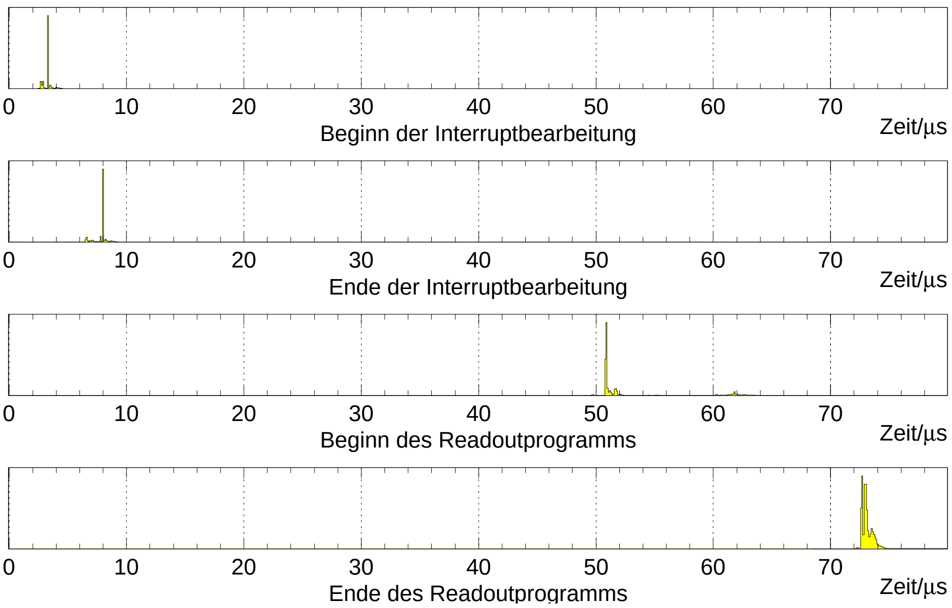

Abbildung 6.3: Zeitspektrum wichtiger Punkte bei der Eventauslese mit LynxOS 2.4

- Beginn der Interruptbehandlung im Treiber:
  Das ist der früheste Zeitpunkt, der der Software zugänglich ist. Die Zeit davor wird vom Betriebssystem benötigt, um die Interruptquelle festzustellen und den zuständigen Treiber aufzurufen.

- Ende der Interruptbehandlung im Treiber:
  Der Treiber hat im Synchronisationsmodul das Interruptflag zurückgesetzt und übergibt die Kontrolle an das Readoutprogramm.

- Beginn des Readoutprogramms:
  Naiverweise sollte man denken, daß das Readoutprogramm direkt nach dem Verlassen des Treibers aktiviert wird, jedoch geht hier je nach Betriebssystem erhebliche Zeit verloren. Die Zeit wird vom Betriebssystem für interne Verwaltung, Scheduling und Kontext-Wechsel verwendet. Genauere Untersuchungen darüber wurden nicht angestellt, da darauf ohne weitgehende Änderungen am Kern des Betriebssystem ohnehin kein Einfluß zu nehmen ist.

- Ende des Readoutprogramms:
  Dieser Zeitpunkt entspricht dem Ende der Totzeit, der nächste Trigger kann akzeptiert werden. Das Betriebssystem benötigt danach noch Zeit, um die ausgelesenen Daten über Ethernet zum Event-

builder zu senden, diese Arbeit läuft im Hintergrund und behindert die Bearbeitung folgender Trigger nicht.

Um von Eigenschaften unterschiedlicher Hardware unabhängig zu sein, wurden alle drei Betriebssysteme auf demselben PC mit einem Pentium-Prozessor mit 166 MHz Taktfrequenz installiert und die Messungen dort durchgeführt. Bemerkenswert ist, daß bei LynxOS die Verteilungen deutlich schmaler sind als bei NetBSD und Linux. Linux erweist sich bei dieser Anwendung als das schnellste Betriebssystem. Wegen der im ZEL vorhanden guten Kenntnisse der internen Programmierschnittstellen für Treiber fiel trotzdem die (nicht unwiderrufliche) Wahl auf NetBSD.

Übertragungsrate zum Eventbuilder:
Als Datenquelle wurde hier ein EMS-Server auf einem PC ohne angeschlossene Digitalisierungshardware verwendet, als Datensenke ein EMS-Server (Eventbuilder) auf einer Alpha-Workstation. Beide waren entweder über Ethernet oder Fast-Ethernet verbunden. Die Daten wurden im PC erzeugt und in der Workstation ohne weitere Verarbeitung vernichtet. Bei konstanter Triggerrate (1000 Hz) wurde die Eventgröße erhöht, bis die Übertragungsrate konstant wurde. Dabei wurden für Ethernet 1.05 MByte/s und für Fast-Ethernet 4.2 MByte/s erreicht. Die Zahl für Ethernet ist das technisch mögliche Maximum. Da andere Tests mit optimierten Testprogrammen ergaben, daß über Fast-Ethernet etwa 6 bis 7 MByte/s erreicht werden können, ist die Ursache der geringeren gemessenen Datenübertragungsraten zum Eventbuilder in der internen Verwaltung der EMS-Server zu suchen. Hier sind in Zukunft noch Verbesserungen denkbar.
In einem weiteren Versuch wurden sechs PCs als Datenquelle und ein PC als Datensenke verwendet, dabei war die Summe der Übertragungsraten (über Fast-Ethernet) wiederum maximal 4.2 MByte/s.
Auch hier wurde mit Hilfe des Synchronisations- und Diagnose-Moduls ein Spektrum der Totzeiten aufgenommen, wobei sich beim Erreichen der maximalen Datenrate ein unerwarteter Effekt zeigt (Abb. 6.4). Die Häufigkeitsskala ist hier logarithmisch geteilt. Es treten Totzeiten im Bereich um 60 Millisekunden auf, die durch die Speicherverwaltung im Zusammenhang mit den Clustern zu erklären sind. Sind alle Zwischenspeicher für Cluster belegt, wird ein neuer Trigger erst wieder akzeptiert, wenn ein komplettes Cluster übertragen worden ist. Das dauert bei Ethernet ($\approx$ 1 MByte/s) und einer Clustergröße von 64 KByte etwa 60 ms.

Übertragungsrate zum Magnetband:
Die Versuchsanordnung war die gleiche wie oben, jedoch wurden die Daten vom Eventbuilder auf ein Magnetband (DLT 4000, Kompression aus-

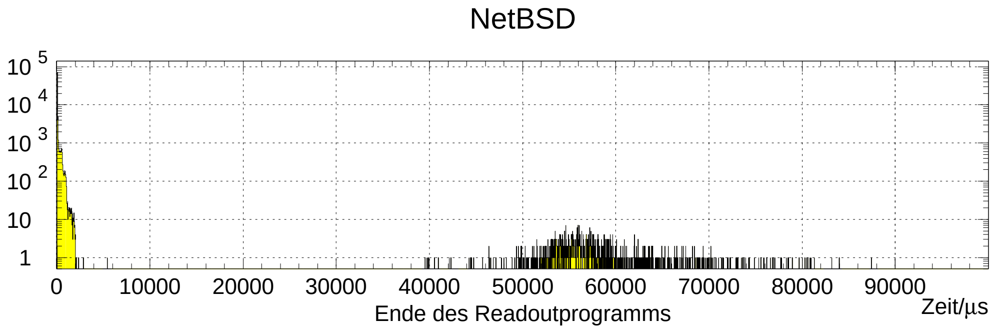

Abbildung 6.4: Spektrum der Totzeiten bei maximaler Übertragungsrate

geschaltet) geschrieben. Dabei ist die maximale Datenrate 1.5 MByte/s. Im Datenblatt des Magnetbandgerätes sind 3 MByte/s angegeben, jedoch gilt diese Zahl nur im komprimierenden Modus des Gerätes. Tests mit COSY–11-Daten zeigen eine mögliche maximale Kompressionsrate von etwa 1.3, so daß die Kompression keinen wesentlichen Gewinn erwarten läßt.
Die beiden letzten Messungen (Übertragungsrate zum Eventbuilder und zum Magnetband) wurden auch mit einer Alpha-Workstation als Datenquelle und einem PC als Eventbuilder vorgenommen, die Meßwerte ändern sich dabei nicht signifikant.

6.4.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die pro Event vom Crate-Controller verursachte Totzeit deutlich unter 100 μs liegt. Diese Aussage gilt unabhängig vom verwendeten Betriebssystem, so daß dessen Auswahl nach programmiertechnischen und preislichen Gesichtspunkten getroffen werden kann.
Die eigentliche CAMAC- oder Fastbus-Auslese wird, zumindest bei FERA- bzw. multiblockfähigen Modulen keinen weiteren Beitrag zu dieser Totzeit leisten, da das Auslesen durch die Hardware gleichzeitig mit der Eventverwaltung im Prozessor erledigt wird.
Fast-Ethernet ist für den Datentransport geignet, auch der TCP-Verwaltungs-Overhead stellt kein Problem dar.
Die maximale Datenrate wird durch das verwendete Magnetbandgerät auf etwa 1.5 MByte/s beschränkt. Diese würde bei einer Eventrate von 10000/s (einer Totzeit von 100 μs entsprechend) jedoch schon bei Eventgrößen von 160 Byte erreicht werden. Ein schnelleres Bandgerät würde hier zu einer Verbesserung führen.

Kapitel 7

Auswertung des Experiments zur η–Produktion und Ergebnisse

7.1 Strahlzeit

Die hier gezeigten Daten wurden in einer Strahlzeit vom 31. Oktober bis 5. November 1996 aufgenommen. In 24 Files wurden etwa 17 Millionen Events aufgezeichnet. Nur die 13 größten Files, die fast 99 % aller Events enthalten und etwa 75 Stunden Strahlzeit repräsentieren, wurden zur Auswertung herangezogen. Zusätzlich wurden 8 Stunden ohne Target aufgezeichnet.

Es wurde mit einem COSY–Zyklus von 370 Sekunden gemessen, 21.5 Sekunden davon entfielen auf Injektion, Beschleunigung sowie Strahlpräparation. Innerhalb der verbleibenden 348.5 Sekunden wurde der Strahl von 1972.0 MeV/c auf 2001.5 MeV/c zeitlinear beschleunigt. Das entspricht im Schwerpunktsystem einem Energiebereich von 3.5 MeV unterhalb bis 6.8 MeV oberhalb der η-Produktionsschwelle.

Gegenüber einer Messung bei unterschiedlichen diskreten Impulsen hat die Messung mit beschleunigtem Strahl („Rampe“) folgenden Vorteil: Die direkte Einstellung eines diskreten Impulses ist bei COSY nur mit einer relativen Unsicherheit von etwa 10^{-3} möglich. Diese Unsicherheit tritt bei der Messung mit Rampe zwar als systematischer Fehler auf, jedoch sind alle Impulse gleichermaßen betroffen, so daß die Ergebnisse bei unterschiedlichen Impulsen ohne weiteres verglichen werden können.

7.2 Werkzeuge für die Auswertung

Für die Auswertung der Daten wurde das von COSY–11-Kollaborations-Mitgliedern entwickelte und gepflegte Programmpaket „da“ verwendet. Es besteht aus einem Programmrumpf, der Eventdaten aus einem mit EMS geschriebenen File einliest, dekodiert und einer von Fall zu Fall neu zu schreibenden Auswerteprozedur anbietet. Weiterhin existieren Prozeduren für Detektorkalibration, Koordinatentransformationen und Spurrekonstruktion. „da“ wurde teils in Fortran, teils in C geschrieben und macht Gebrauch von Teilen der CERNLIB.
Durch die Modularisierung der Programmteile sind wenige hundert Zeilen zusätzlicher FORTRAN-, C- oder C++-Code für eine Auswertung ausreichend.

7.3 Ereignisselektion

Da weder die erzeugten η–Mesonen noch ihre Zerfallsprodukte mit den Detektoren des COSY–11-Spektrometers nachgewiesen werden können, erfolgt die Eventrekonstruktion durch die Analyse der zwei Protonen im Ausgangskanal und der „Missing Mass[1]“-Methode.

Zunächst wurden alle Events mit weniger als 24 Treffern in den Driftkammern verworfen. Die Driftkammern haben insgesamt 14 Ebenen, so daß von zwei Protonen 28 Treffer zu erwarten sind, wegen der ausreichenden Redundanz kann das Fehlen einzelner Ebenen toleriert werden. In der Tat zeigt die Verteilung der Anzahl der Driftkammerhits pro Event (Abb. 7.1) deutliche Häufungen bei 14 und 28 Hits (Ein- bzw. Zweispurevents), jedoch auch einen gewissen Anteil von Events mit weniger Treffern. Die geringe Häufung bei acht Treffern ist durch die teilweise Nichtbelegung der Flächen bei den um 31° geneigten Driftkammern, siehe Abbildung 3.5 auf Seite 19, bedingt.

Da von vorherigen Auswertungen bekannt war, daß Ereignissen mit mehr als etwa 60 Driftkammerhits keine physikalisch sinnvolle Reaktion zuzuordnen ist und die von der Rekonstruktionsprozedur benötigte Rechenzeit bei sehr vielen Treffern extrem ansteigt, wurden Events mit mehr als 60 Treffern verworfen, das ist ein Anteil von etwa 10^{-5} aller Events.

Nach dieser ersten Selektion kommen lediglich noch etwa 2 Millionen Ereignisse als Kandidaten für Zweispurevents in Frage, so daß die Rekonstruktion der Spuren in den Driftkammern, die erhebliche Zeit beansprucht (zwischen 10 und 500 ms pro Event), nicht unakzeptabel lange dauert.

[1] „fehlende Masse“, rekonstruierte Masse der nicht direkt beobachteten Teilchen

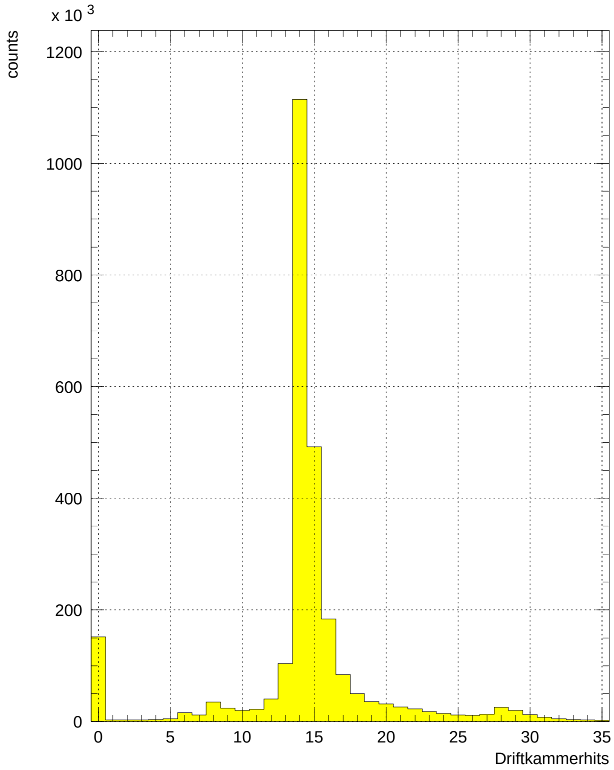

Abbildung 7.1: Verteilung der Anzahl der Driftkammerhits pro Event

Die Kenntnis der Richtung der Spuren in den Driftkammern erlaubt eine Spurrekonstruktion im Dipolmagneten unter der Annahme, daß die Spur des Teilchens das Targetvolumen durchquert. Diese Spurrekonstruktion ist ein iteratives Verfahren, das einen mittleren Teilchenimpuls annimmt und damit die entsprechende Teilchenbahn, unter Verwendung von Daten über den genauen Verlauf des Magnetfeldes, berechnet. Die Abweichung der Bahn vom bekannten Targetort wird zur Korrektur des Teilchenimpulses verwendet. Nach einigen Durchläufen ist eine gute Schätzung des Impulses verfügbar.
Mit Hilfe der Richtung der Spuren in den Driftkammern können die zugehörigen Treffer in den Szintillatoren S1, S2 und S3 identifiziert werden. Die daraus ablesbare Flugzeit liefert die Geschwindigkeit des Teilchens und, zusammen mit dem Impuls, die invariante Masse. Abbildung 7.2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Quadrate der so gewonnenen Massen. Die deutlichen Häufungen in der Umgebung von 0.02 und 0.88 $\mathrm{GeV}^2/\mathrm{c}^4$ können mit Pionen und Protonen identifiziert werden.

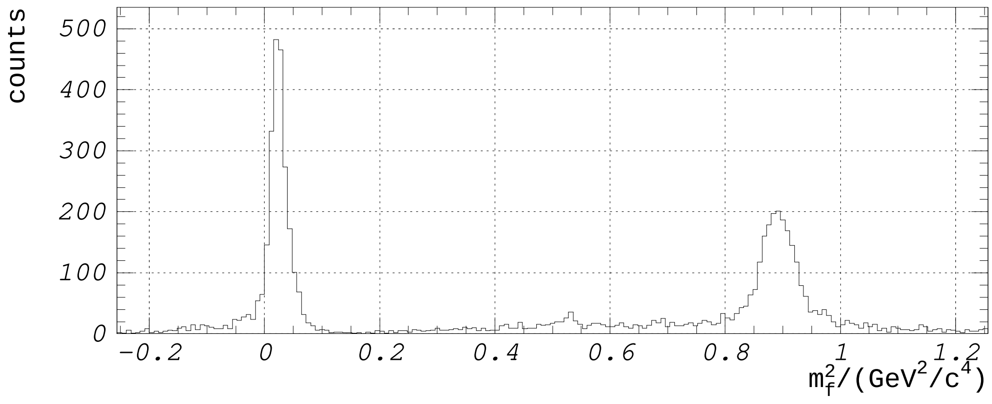

Abbildung 7.2: Quadrate der rekonstruierten invarianten Massen

Im weiteren wird angenommen, daß Teilchen mit einer invarianten Masse, deren Quadrat um nicht mehr als 0.1 $\mathrm{GeV}^2/\mathrm{c}^4$ von dem Schwerpunkt des „Protonenpeaks“ abweicht, Protonen sind, und es wird ihnen die bekannte reale Protonenmasse zugeordnet.

Für alle Events mit zwei Protonenspuren lassen sich dann Masse und Impuls eines dritten, nicht nachgewiesenen Teilchens im Ausgangskanal berechnen.

7.4 Produzierte η-Mesonen

Das Massenspektrum der nicht direkt nachgewiesenen Teilchen (Missing Mass) ist in seiner Amplitude deutlich abhängig vom Strahlimpuls und ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Der gesamte Impulsbereich wurde dabei in sechs gleiche Teile geteilt. Wie sich später zeigt (Kapitel 7.5), war die Luminosität im obersten Bereich deutlich geringer als in den anderen, so daß vor einem direkten Vergleich eine Normierung unerläßlich ist.

Die sechs Spektren in Abbildung 7.3 zeigen neben dem deutlichen Peak für die η-Produktion oberhalb der Schwelle (die bei einem Impuls der Strahlprotonen von 1982 MeV/c erreicht wird) einen breiten Untergrund. In der hier gewählten Missing-Mass-Analyse ist dieser Untergrund nicht zu umgehen, da beispielsweise die N–Pionenproduktion ($\mathrm{N} \leq 4$) eine Missing Mass im Bereich der η-Produktion vortäuschen kann. Simulationsberechnungen [Mos98] zeigen, daß unter Berücksichtigung der Detektorakzeptanz der Untergrund sehr gut durch die Reaktionen $pp \to pp\pi^+\pi^-$ und $pp \to pp\pi^+\pi^-\pi^0$ wiedergegeben wird.

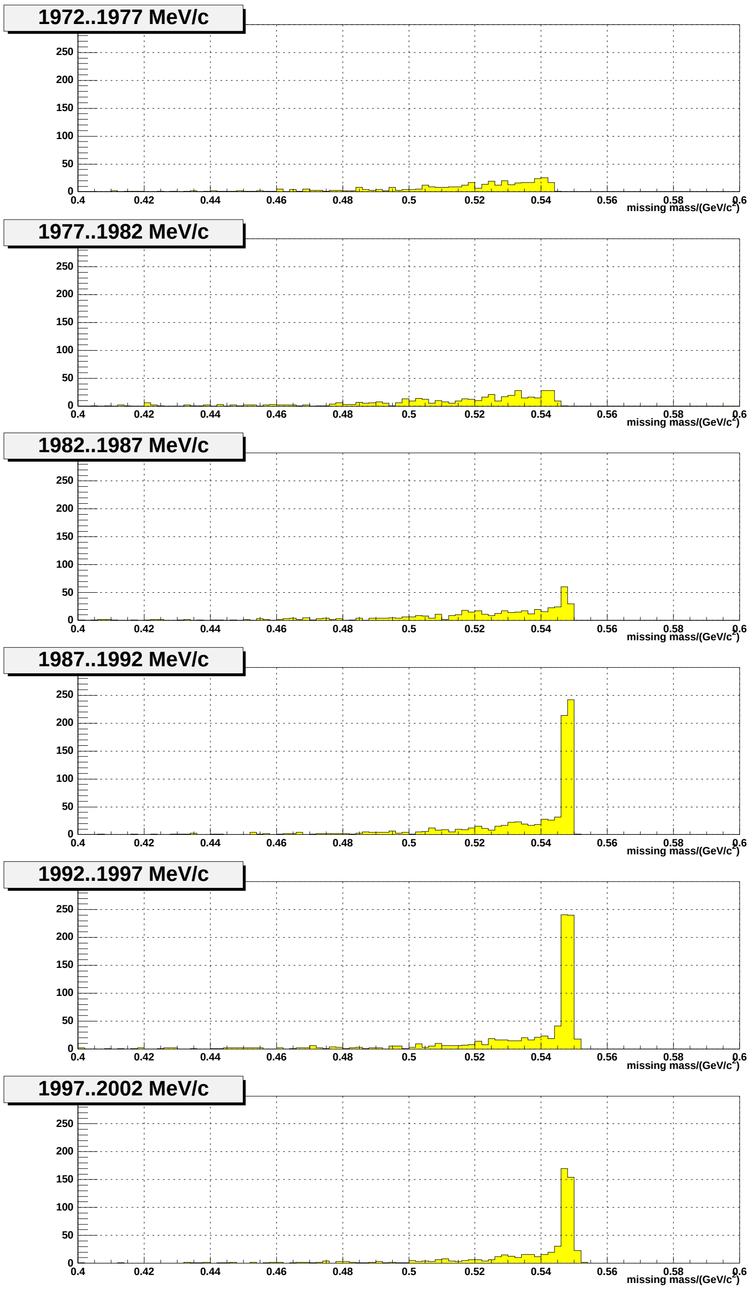

Abbildung 7.3: Missing-Mass-Spektren für verschiedene Impulsbereiche. Die beiden oberen Spektren gehören zu Impulsen unterhalb der Produktionsschwelle (1982 MeV/c), in den vier unteren Spektren ist die beginnende Produktion von η-Mesonen mit einer Masse von 547 MeV/c^2 deutlich zu erkennen. Laut [PDG97] liegt die η-Masse bei (547.30 ± 0.12) MeV/c^2.

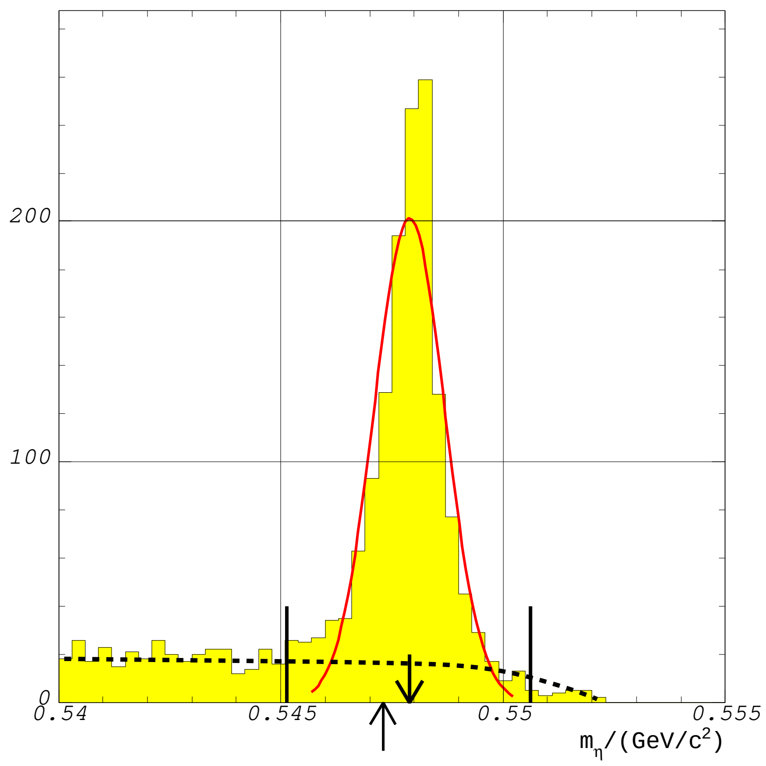

Abbildung 7.4: Missing-Mass-Verteilung aller Ereignisse über der Schwelle. Die gemessene Masse des η-Mesons (dicker Pfeil) von (547.9 ± 0.8) MeV/c^2 stimmt im Rahmen der Fehlergrenzen mit dem Literaturwert von (547.30 ± 0.12) MeV/c^2 [PDG97] (dünner Pfeil) überein. Für die weiteren Berechnungen wurde der mit Strichen markierte Bereich von 545.2 bis 550.6 MeV/c^2 verwendet. Die gestrichelte Linie ist der extrapolierte Untergrundverlauf.

Es zeigt sich, daß unter Verwendung des aus den COSY-Betriebsparametern errechneten nominalen Strahlimpulses die Masse des η-Mesons mit 547.9 MeV/c^2 ($\pm$0.8 MeV/c^2) im Rahmen der Fehlergrenzen mit dem Literaturwert von (547.30 ± 0.12)MeV/c^2 [PDG97] übereinstimmt (siehe Abb. 7.4). Für die weiteren Berechnungen wurden diejenigen Ereignisse verwendet, bei denen das Quadrat der Missing Mass um nicht mehr als $3 \cdot 10^{-3}$ GeV^2/c^4 vom Quadrat dieser gemessenen Masse abweicht.
In der vorliegenden Arbeit wurde der Untergrund unterhalb des η–Peaks aus den extrapolierten kleineren Missing-Mass-Werten abgeschätzt. Für den Fall, daß auch bei schwererer Missing-Mass Ereignisse beobachtet werden konnten, wurden diese mit herangezogen. Ein typischer Untergrundverlauf ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

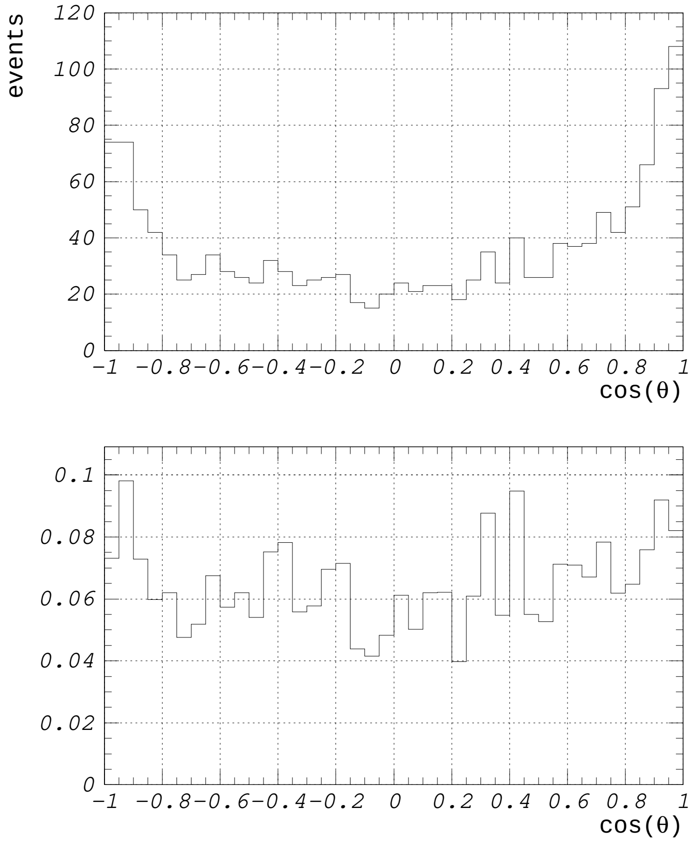

Abbildung 7.5: Verteilung der Winkel der rekonstruierten Impulse der η-Mesonen im Schwerpunktsystem zur Strahlrichtung. Oben die gemessene Verteilung, unten nach Division durch die entsprechenden Monte-Carlo-Werte.

In Abbildung 7.5 zeigt die Winkelverteilung der rekonstruierten Impulse der η-Mesonen im Schwerpunktsystem. Oben ist die Verteilung der Winkel der gemessenen η–Ereignisse dargestellt, unten die Verteilung nach Division durch die entsprechenden Ergebnisse der Monte-Carlo-Rechnungen. Die Winkelverteilung zeigt die erwartete Symmetrie zur 90°-Richtung ($\cos(\theta) = 0$), das vornehmlich isotrope S-Wellen-Verhalten wird (im Rahmen der statistischen Fluktuationen) auch bestätigt. Die deutliche Abweichung der gemessenen Winkel von einer Gleichverteilung resultiert in erster Linie aus der Abschattung der Protonen durch das Austrittsfenster bei einer großen vertikalen Impulskomponente. Da Protonen mit höheren Transversalimpulsen erst nach einer längeren Flugstrecke durch das Fenster treten, ist der vertikale Öffnungswinkel für sie kleiner. Das führt zu der beobachteten Bevorzugung von η–Mesonen in

Vorwärtsrichtung und mit kleinen Winkeln zur Strahlachse.

7.5 Bestimmung der Luminosität

Um zu normierten Werten der Mesonenproduktion und damit letztlich zu Wirkungsquerschnitten zu gelangen, ist die Kenntnis der *Luminosität* unumgänglich. Bei einem Speicherring wie COSY mit ortsfestem Target ist sie durch

$$L = N_p \cdot \nu_p \cdot \rho_T \cdot F \tag{7.1}$$

bestimmt. (N_p: mittlere Anzahl der im Speicherring zirkulierenden Protonen, ν_p: Umlauffrequenz, ρ_T: Flächendichte des Targets, F: Anteil des Strahles, der das Target trifft). Da außer ν_p keine Größe einer einfachen direkten Messung zugänglich ist, erfolgt die Bestimmung der Luminosität durch eine simultane Messung der elastischen Proton-Proton-Streuung.

Aus kinematischen Gründen kann das Detektorsystem von COSY–11 nicht gleichzeitig beide Protonen in Driftkammersystem und Szintillatoren nachweisen und zuverlässig identifizieren. Wenn ein Proton den Dipolmagneten in Richtung Driftkammern verläßt und damit seine Spur rekonstruiert werden kann, wird das andere in Richtung Dipoljoch das Target verlassen. Dort trifft es einen Silizium-Pad-Detektor, dessen (horizontale) Ortsauflösung von 4.5 mm geeignet ist, um genug Information für eine Identifizierung elastischer Ereignisse zu liefern. Da die geometrische Akzeptanz sehr klein wird, wenn man auch Treffer in der Szintillatorwand S3 fordert, wurde auf eine Messung der Flugzeit vollständig verzichtet.
Der erste Schritt bei der Identifizierung elastischer Ereignisse ist die Untersuchung der Koinzidenz der Richtungen der beiden mutmaßlichen Protonen. Dazu werden (für einen kleinen Teil der verfügbaren Daten) alle Spuren durch die Driftkammern rekonstruiert und der Durchstoßpunkt der Spuren durch eine geeignete Ebene (hier der Szintillator S1) bestimmt. Trägt man dessen horizontale Koordinate gegen die horizontale Koordinate der Treffer im Silizium-Detektor auf, zeigt sich ein gut begrenzter „Koinzidenzschlauch“ (Abbildung 7.6). Die weitere Auswertung berücksichtigte nur Daten dieser kinematisch sinnvollen Koinzidenzen. Für diese Ereignisse werden alle Spuren rekonstruiert und für die Spuren, die in Koinzidenz mit dem Treffer im Silizium-Detektor sind, der Impuls bestimmt unter der Hypothese, daß es sich hier um elastisch gestreute Protonen handelt. Mit diesen Annahmen wird dann die Masse des Teilchens, das den Silizium-Detektor getroffen hat, bestimmt. Eine falsche Hypothese über die Art des ersten Teilchens wird hier zu einem

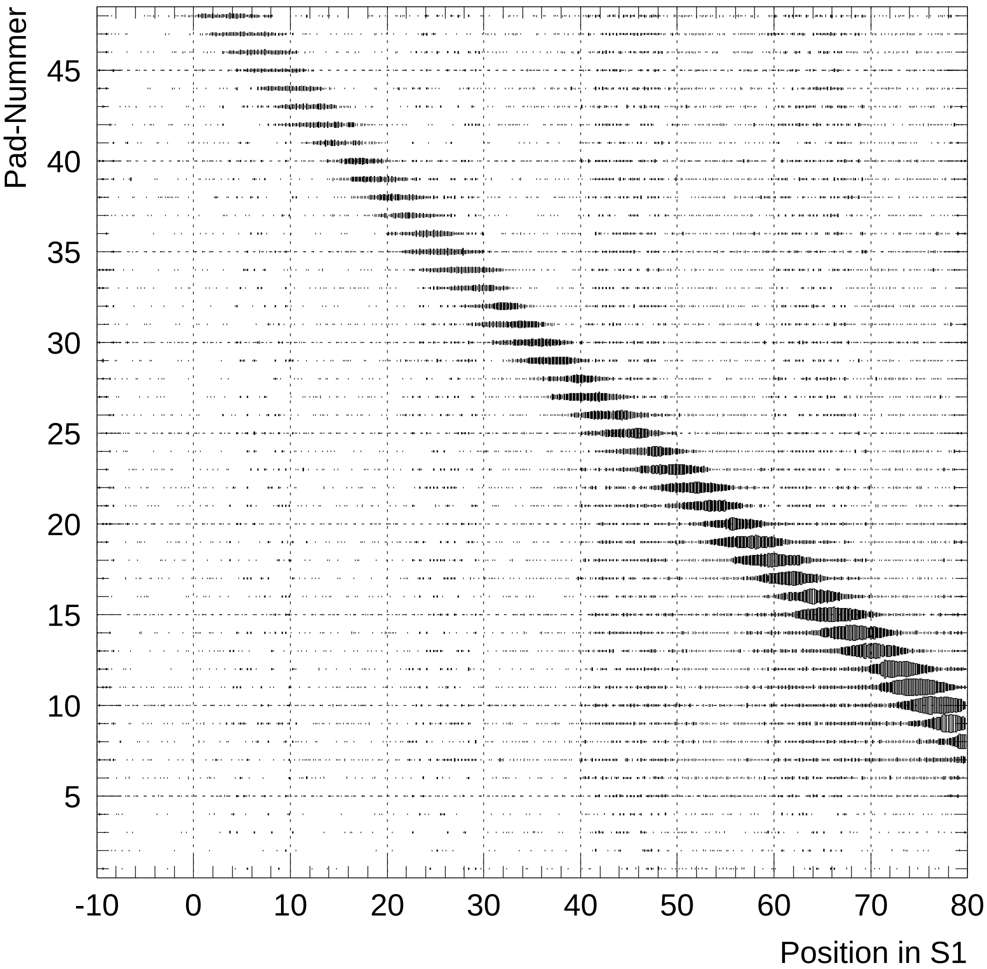

Abbildung 7.6: Koinzidenz zwischen Szintillator S1 und Silizium-Monitor bei elastischen Ereignissen

von der Protonenmasse stark abweichenden Ergebnis führen und kann dadurch ausgeschlossen werden.

Abbildung 7.7 zeigt die Verteilung der Missing-Mass der Teilchen, die den Silizium-Monitor getroffen haben. Der grau unterlegte Bereich entspricht Massen, die nicht mehr als 0.3 $\mathrm{GeV}^2/\mathrm{c}^4$ vom Quadrat der Protonenmasse abweichen. Nur Ereignisse aus diesem Bereich wurden später für die Berechnung der Luminosität verwendet.

In Abbildung 7.8 (auf Seite 65) sind oben die Impulse im Laborsystem aller Ereignisse, die zu einer Koinzidenz der Treffer im Silizium-Detektor und auf der S1–Ebene führen, zu sehen. Unten wurde zusätzlich

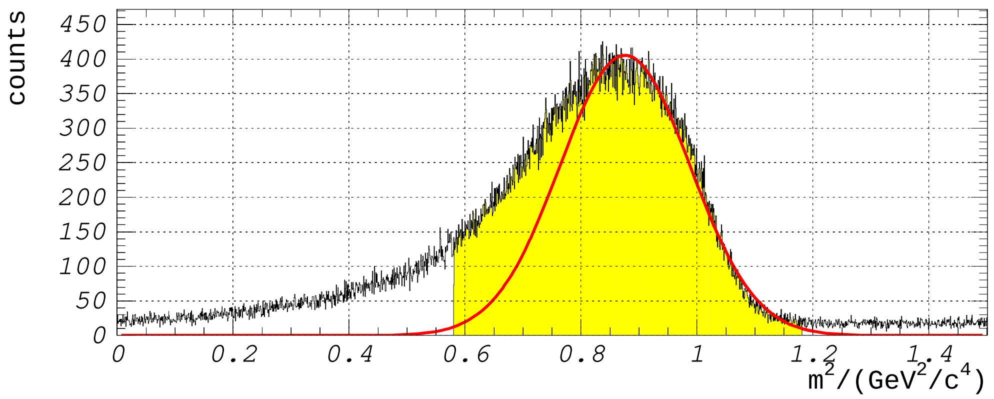

Abbildung 7.7: Missing-Mass des im Monitordetektor nachgewiesenen elastisch gestreuten Protons. Die Ereignisse im grau gekennzeichneten Bereich wurden für die Bestimmung der Luminosität verwendet.

gefordert, daß das Quadrat der rekonstruierten Masse des den Silizium-Detektor treffenden Teilchens nicht mehr als 0.3 $\mathrm{GeV}^2/\mathrm{c}^4$ vom Quadrat der Protonenmasse abweicht. Das entspricht dem grau unterlegten Bereich in Abbildung 7.7. Die eingezeichneten Ellipsen kennzeichen die für elastische Ereignisse kinematisch möglichen Impulse.

Die so gewonnene Rate elastischer Ereignisse ist bereits in guter Näherung proportional der Luminosität, da der Strahlimpuls in der gemessenen Rampe nur um 1.4 % variiert und damit Wirkungsquerschnitt und Akzeptanz nahezu konstant sind.
Die Akzeptanz des Detektorsystems für elastische Ereignisse kann aus Monte-Carlo-Rechnungen gewonnen werden, für die differentiellen Wirkungsquerschnitte stehen seit Ende 1996 Daten aus einem anderen COSY-Experiment (EDDA [Alb97]) zur Verfügung. Die entsprechenden Streuwinkel wurden den rekonstruierten elastischen Ereignissen entnommen.

7.6 Totale Wirkungsquerschitte

Der totale Wirkungsquerschnitt kann berechnet werden aus der Anzahl der beobachteten η-Produktionsereignisse N, der Akzeptanz des Detektorsystems A und dem Integral über die Luminosität L gemäß

$$\sigma = \frac{N}{A \cdot \int L dt} \tag{7.2}$$

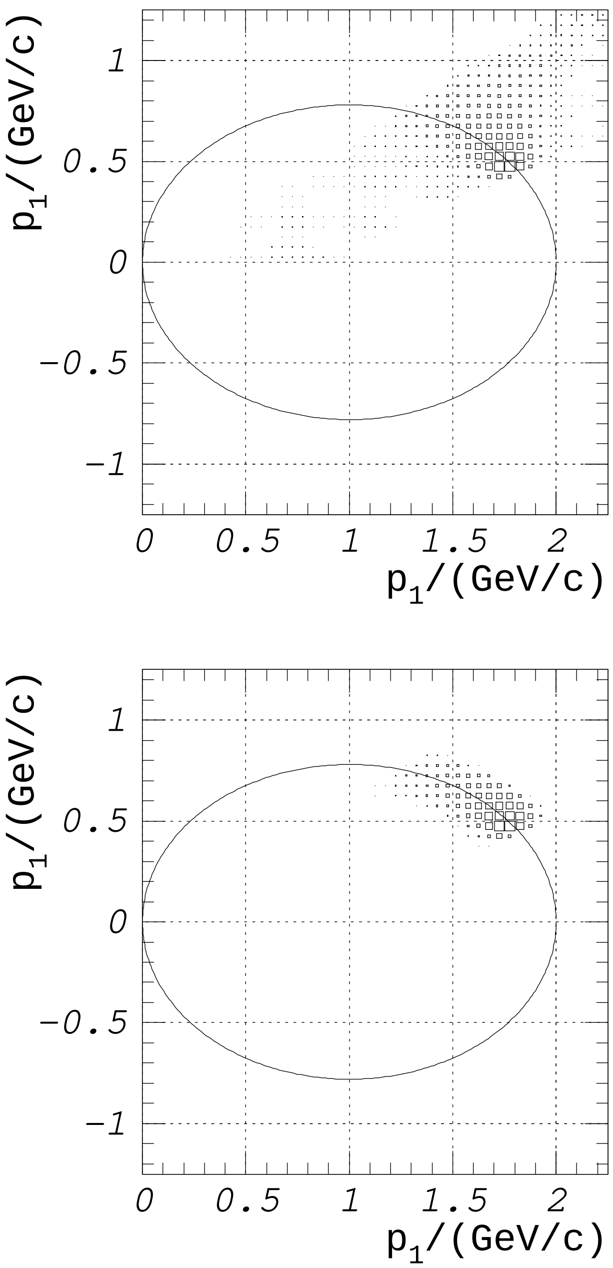

Abbildung 7.8: Laborimpuls von Einspur-Protonen-Ereignissen. Oben bei Koinzidenz zwischen Szintillator S1 und Silizium-Monitor, unten bei zusätzlicher Selektion durch die Missing-Mass.

Bisher wurde die Zahl der produzierten η–Mesonen und die Luminosität als Funktion des Stahlimpulses bestimmt. Wärend die Akzeptanz des Detektorsystems für elastische Ereignisse nahezu konstant ist, ändert sie sich für η–produzierende Ereignisse in der Nähe der Schwelle stark. Das

liegt daran, daß sich der Kegel der Protonen im Ausgangskanal über der Schwelle schnell öffnet und über den von den Detektoren abgedeckten Raumwinkelbereich hinausgeht. Um zu totalen Wirkungsquerschnitten zu gelangen, wurden Monte-Carlo-Rechnungen durchgeführt, die Werte für die relative Akzeptanz als Funktion des Strahlimpulses liefern.
Damit können nun totale Wirkungsquerschnitte der η–Produktion berechnet werden. Die Tatsache, daß statt bei diskreten Impulsen in einer Rampe gemessen wurde, führt dazu, daß man, um zu Werten mit akzeptablen statistischen Fehlern zu kommen, den von der Rampe überdeckten Impulsbereich in Abschnitte einteilen muß. Je größer die Abschnitte sind, desto höher ist die Zahl der Ereignisse, entsprechend kleiner ist der relative statistische Fehler. Aber die Impulsunschärfe ist mindestens so groß wie die Abschnitte. Es muß also nach einen Kompromiß gesucht werden.

Der Impulsbereich von 1972 MeV/c bis 2002 MeV/c wurde einmal in zwölf und einmal in 30 Abschnitte eingeteilt. In Abbildung 7.9 sind die korrigierten Verteilungen der Massen von η-Kandidaten dargestellt. Für die physikalisch nicht relevanten Messungen unterhalb der Schwelle wurde der Akzeptanzfaktor auf 1 gesetzt. Der Einbruch bei 1.996 GeV/c im unteren Bild resultiert wahrscheinlich aus den dort vorhandenen größeren statistischen Fehlern.

Bei Einteilung in zwölf Abschnitte (acht davon oberhalb der Schwelle) liegen die statistischen Fehler zwischen 7 und 10 %, für die Berechnung der totalen Wirkungsquerschnitte wurde deshalb diese Aufteilung gewählt. Dabei wurden nur diejenigen η–Ereignisse akzeptiert, bei denen das Quadrat der Masse des dritten Teilchens um nicht mehr als $3 \cdot 10^{-3}$ GeV^2/c^4 vom Quadrat der gemessenen η–Masse abweicht (siehe Abbildung 7.4 auf Seite 60). Abbildung 7.10 zeigt die so gewonnenen Wirkungsquerschnitte. Zum Vergleich sind sie in Abbildung 7.11 mit den bereits bekannten Werten kombiniert.

Wenn man zusätzlich zu den Viererimpulsen der drei Teilchen im Ausgangskanal die Massen als gegeben annimmt, erhält wegen der Impuls- und Energieerhaltung ein überbestimmtes Gleichungssystem. Dies ermöglicht einen kinematischen Fit, der die gemessenen Impulse weiter verbessert. Wegen der unvermeidlichen Meßungenauigkeiten ist das Voraussetzung für die Erstellung eines Dalitzplots. Hierbei wurde die Zahl der Ereignisse als Funktion der Quadrate der invarianten Massen des schwereren bzw. des leichteren Proton-η-Systems dargestellt. In Abbildung 7.12 oben sind die gemessenen Werte von etwa 500 Events bei einer mittleren Strahlenergie von 1266 MeV/c^2 (einem Strahlimpuls von

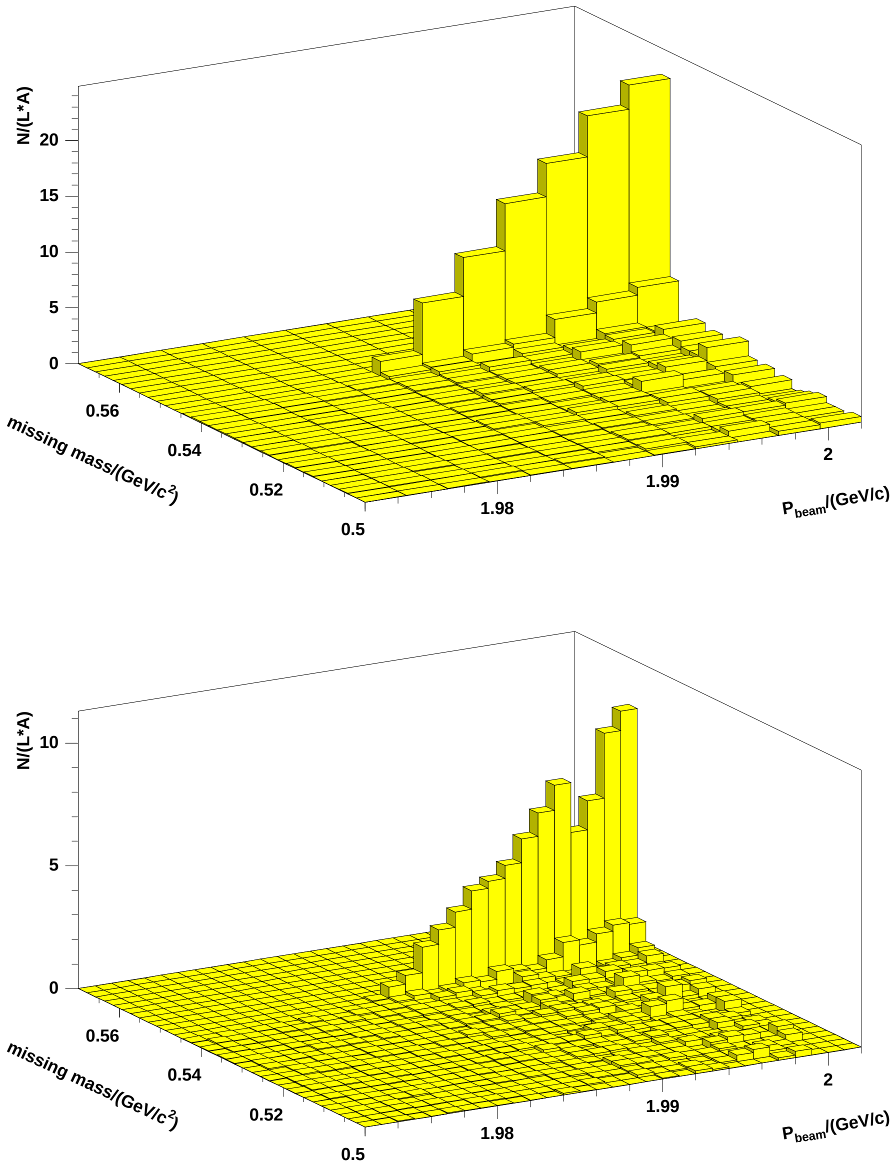

Abbildung 7.9: Luminositäts- und akzeptanzkorrigierte Verteilung der Masse von η-Kandidaten in zwölf (oben) und 30 (unten) Impulsbereichen. Dargestellt ist der Wert $N/(L \cdot A)$ (N: Anzahl der Ereignisse; L: relative Luminosität; A: Akzeptanz). Die höchste Säule im unteren Bild enthält lediglich 51 Events, es scheint also gerechtfertigt, den Einbruch bei 1996 GeV/c den statistischen Unsicherheiten anzulasten.

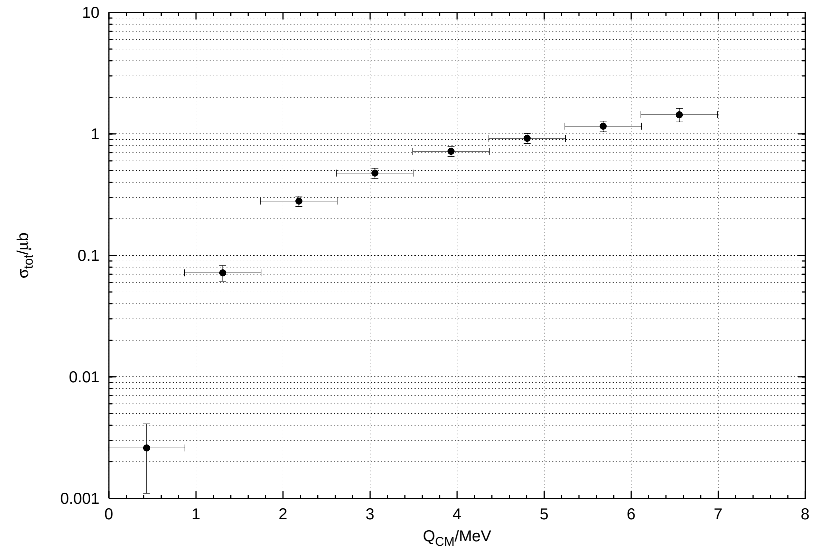

Abbildung 7.10: Totale Wirkungsquerschnitte der η–Produktion. Die eingezeichneten Fehler für σ sind nur die statistischen Fehler, die Fehler der Energie im Schwerpunktsystem entsprechen der Breite der verwendeten Intervalle.

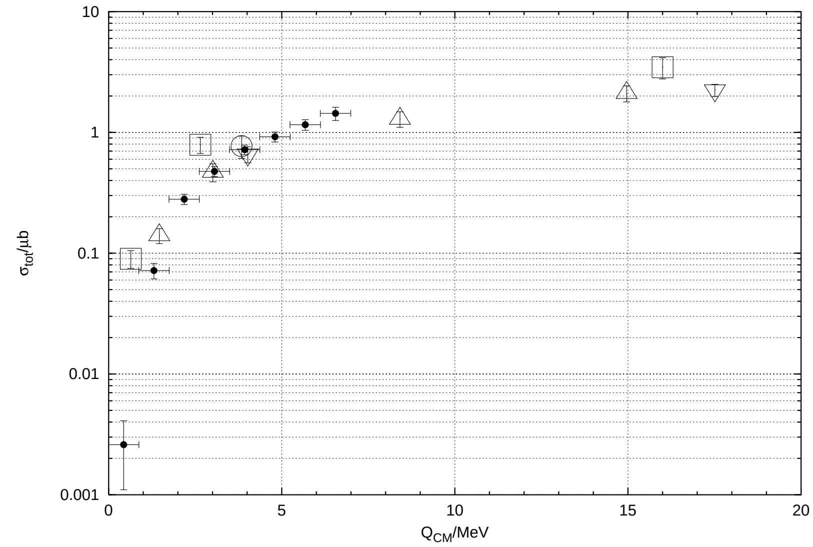

Abbildung 7.11: Totale Wirkungsquerschnitte der Reaktion $pp \rightarrow pp\eta$; $\square$: Bergdolt 1993 [Ber93], $\triangle$: Calén 1996 [Cal96], $\bigtriangledown$: Chiavassa 1994 [Chia94], $\bigcirc$: COSY–11 1995 [COS95], $\bullet$: diese Arbeit.

1994.6 MeV/c entsprechend) gezeigt. Das untere Diagramm enthält entsprechende Monte-Carlo-Daten, wobei nur der verfügbare Phasenraum, nicht aber die Proton-Proton-Final-State-Interaction (Endzustandswechselwirkung) Berücksichtigung fand.

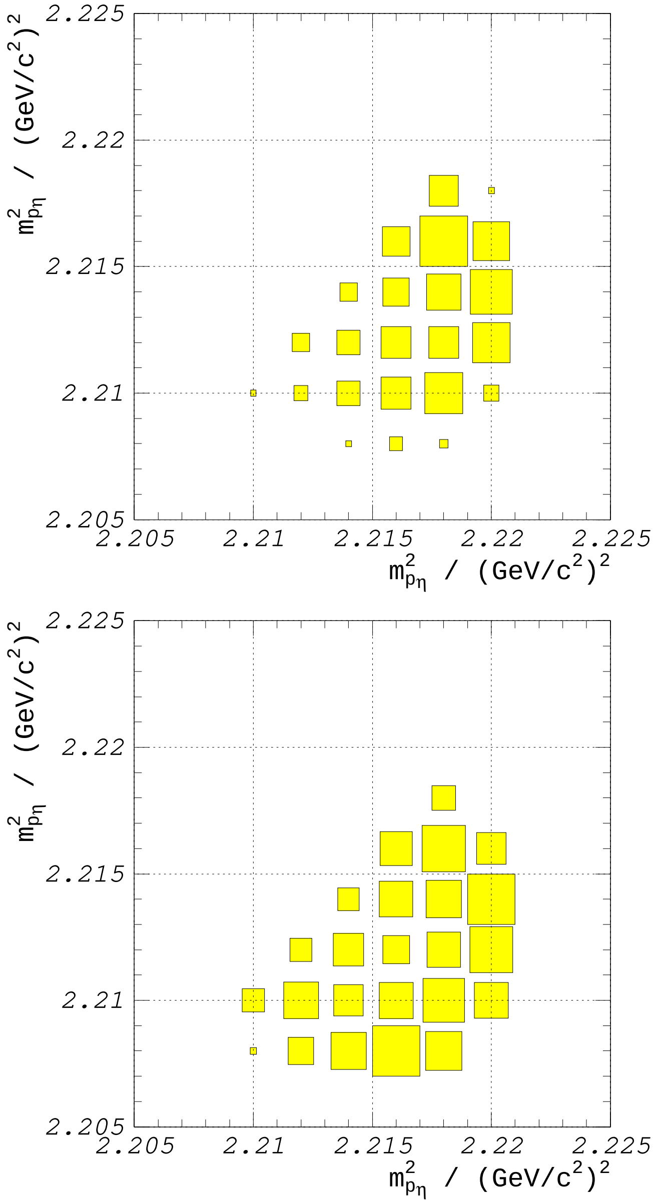

Abbildung 7.12: Dalitzplot der invarianten Masse des „leichteren“ Proton-η-Systems gegen die invariante Masse des “schwereren“ Proton-η-Systems. Oben gemessene Werte, unten Monte-Carlo-Daten.

Für Abbildung 7.13 wurden Experiment- und Monte-Carlo-Daten dividiert, eine Bevorzugung von hohen invarianten Massen des η–p-Systems ist zu erkennen. Der Relativimpuls der beiden Protonen ist hier minimal, es kann daher vermutet werden, daß dieser Effekt von einer starken Final-State-Interaction der Protonen herrührt.

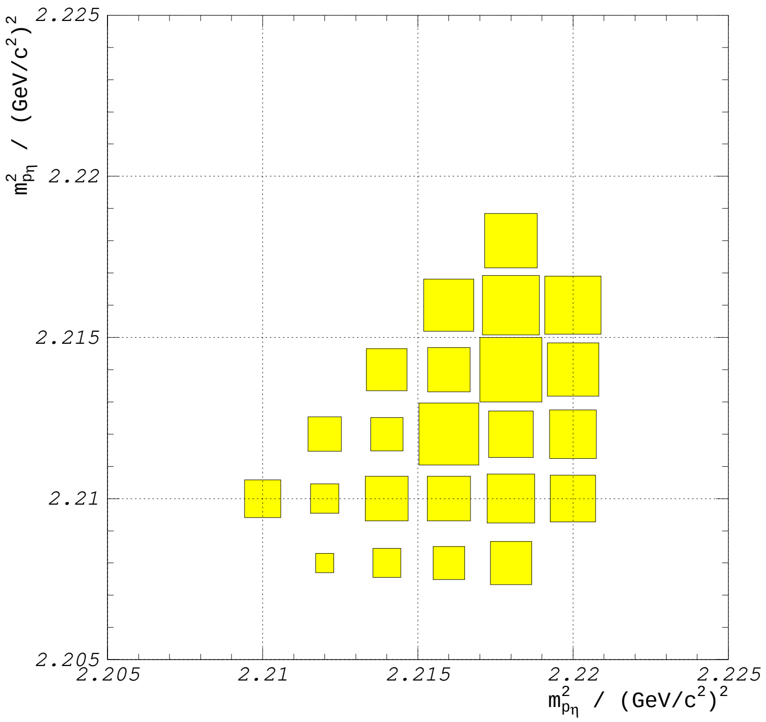

Abbildung 7.13: Dalitzplot der Monte-Carlo-normierten Daten für die invariante Masse des „leichteren“ Proton-η-Systems gegen die invariante Masse des “schwereren“ Proton-η-Systems bei einer Überschußenergie von 4.55 MeV (einer Strahlenergie von 1266.0 MeV bzw. einem Impuls von 1994.6 MeV/c^2 entsprechend).

Zum Vergleich ist hier ein entsprechender Plot aus [Sch95] bei einer Energie von 1352 MeV/c^2 gezeigt (Abb. 7.14), wobei dabei jedoch zum einen mehr als 7000 η-Events verfügbar waren, und zum anderen wegen der relativ großen Überschußenergie von 37.4 MeV der verfügbare Phasenraum ein wesentlich größeres Gebiet umschließt und damit Meßungenauigkeiten eine geringere Rolle spielen. Der Dalitzplot in Abbildung 7.14 zeigt zwei Bereiche mit erhöhter Eintragsrate:

a) In der rechten oberen Ecke, wo beide η–p-Paare einer maximalen invarianten Masse entsprechen, was wiederum gleichzusetzen ist mit dem Fall, daß beide Protonen gemeinsam aus der Reaktion emittieren und das η–Meson mit betragsgleichem Impuls entgegengesetzt zu ihnen fliegt. Folglich ist der relative Proton-Proton-Impuls minimal und führt zu starken p–p-Endzustandswechselwirkungen.

b) Im unteren Bereich mit minimalem relativen η–p-Impuls deutet die erhöhte Eintragsrate auf η–p-Endzustandswechselwirkungen hin. In entsprechenden Messungen zur π^0–Produktion wird eine derartige Erhöhung nicht beobachtet [Bon95].

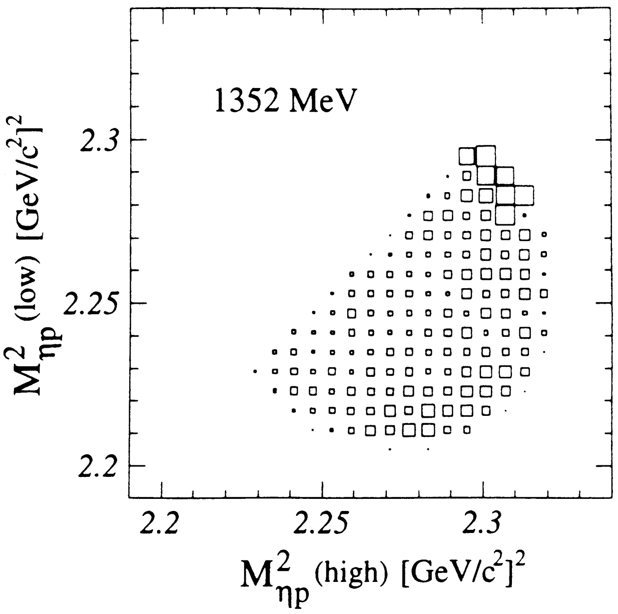

Abbildung 7.14: Zum Vergleich aus [Sch95] entnommener Dalitzplot der invarianten Masse des „leichteren“ Proton-η-Systems gegen die invariante Masse des “schwereren“ Proton-η-Systems bei einer Energie von 1352 MeV/c^2 entsprechend einer Überschußenergie von 37.4 MeV

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Das interne Experiment COSY–11 am Cooler-Synchrotron COSY im Forschungszentrum Jülich ermöglicht ein Studium der Mesonenproduktion in Reaktionen der Art pp $\to$ ppX in der Nähe der Produktionsschwelle mit großer Akzeptanz. Der Massenbereich des erzeugten Mesons wird nach unten durch die Geometrie der Detektoranordnung auf etwa 500 MeV/c^2, nach oben durch die Beschleunigerparameter auf etwa 1 GeV/c^2 begrenzt.

In dieser Arbeit wird die Produktion des η-Mesons bei einer Überschußenergie von 0 bis 7 MeV/c^2 im Schwerpunktsystem untersucht. Dabei wurde der Strahlimpuls in Rampen von 5 Minuten Länge von 1972 auf 2002 MeV/c erhöht. Gegenüber einer Messung von Einzelpunkten hat dies den Vorteil, daß die zur Zeit unvermeidbare absolute Ungenauigkeit der Strahlimpulseinstellung von etwa 2 MeV/c keinen Einfluß auf die Differenzen zwischen verschiedenen gemessenen Impulsen hat. Auch kann, entsprechend der verfügbaren Statistik, die Zahl der zu berechnenden Wirkungsquerschnittspunkte später passend gewählt werden.

Dabei wurden mit Hilfe von zwei Driftkammerpaketen die Richtungen der beiden Protonen im Ausgangskanal bestimmt. Die Rückverfolgung der Trajektorien durch das Magnetfeld des als Analysemagneten benutzten Dipols des COSY-Ringes zum Targetpunkt erlaubt es auch, die Impulse der beiden Protonen festzulegen. Eine Teilchenidentifizierung ist dann mit Hilfe der auf einer Strecke von 9 Metern gemessenen Flugzeit möglich. Dadurch sind die Viererimpulse von vier an der Reaktion beteiligten Teilchen (Strahlproton, Targetproton, beide Protonen im Ausgangskanal) bekannt, Impuls und Masse eines fünften Teilchens, des produzierten η-Mesons, können eindeutig berechnet werden. Die Identifizierung des η-Mesons über die Missing-Mass ist nicht eindeutig, da die Pionenproduktion einen Untergrund erzeugt, der eine Missing Mass im

Bereich der η-Masse vortäuscht. Dieser Anteil liegt bei etwa 15 %.

Aus insgesamt etwas mehr als 1500 beobachteten η-Ereignissen konnten acht Wirkungsquerschnitte mit einem jeweiligen statistischen Fehler von rund 8 % bestimmt werden, die in Abbildung 7.10 gezeigt sind. Diese Werte passen sich widerspruchsfrei in die bislang bekannten Daten ein (Abbildung 7.11).

Nach Anwendung eines kinematischen Fits läßt sich ein Dalitzplot erstellen, der eine deutliche Bevorzugung von hohen invarianten Massen des η–p-Systems zeigt. An dieser Stelle ist der Relativimpuls der beiden Protonen minimal, es kann daraus geschlossen werden, daß dieser Effekt von einer starken Endzustandswechselwirkung der Protonen herrührt. Die bekannte η–p Endzustandswechselwirkung tritt bei der vorliegenden kleinen Ausdehnung des Dalitzplots nicht in Erscheinung.

Die Untersuchung der Mesonenproduktion mit einem leicht beschleunigten Strahl (Rampe) ist gut geeignet, um direkt oberhalb der Schwelle mehrere, je nach Statistik theoretisch beliebig viele, Meßpunkte zu untersuchen. Mit der inzwischen erfolgreich erprobten stochastischen Kühlung von COSY sollten damit Messungen mit hoher Statistik und Genauigkeit auch in einem sehr kleinen Bereich direkt über der Schwelle möglich sein. Voraussetzung dafür ist aber die Verfügbarkeit eines Verfahrens, daß bereits nach einigen wenigen Stunden Strahlzeit eine Bestimmung des absoluten Impulses mit $\Delta p/p < 10^{-4}$ ermöglicht, um den Impuls gegebenenfalls korrigieren zu können. Bei einer Einstellungenauigkeit von $\Delta p/p \approx 10^{-3}$ ist bei sehr kleinen zu untersuchenden Impulsbereichen die Gefahr, daß man „daneben“ mißt, nicht zu vernachlässigen.

Die Erfahrungen mit dem Datenaufnahmesystem von COSY–11 wurden genutzt, um ein neues verbessertes Datenaufnahmesystem aufzubauen. Es wird im Frühjahr 1998 in einem anderen Experiment eingesetzt werden und ist dort bereits erfolgreich im Testbetrieb. Es erlaubt Eventraten von mehreren zehntausend pro Sekunde (einer Totzeit von $\approx$ 100 μs pro Event entsprechend) bei einem maximalen Datendurchsatz von 4 Megabyte pro Sekunde. Dies sind Anforderungen, die COSY–11, insbesondere wegen seines stark selektierenden Triggers, im Moment (noch) nicht hat.

Die grundlegende Idee dabei war, möglichst nur Komponenten zu verwenden, die entweder auf dem PC-Massenmarkt zu kaufen sind, oder zumindest von der Nähe zum Markt profitieren. Dadurch ist (neben erschwinglichen Preisen) gesichert, daß neueste Prozessor- und Peripherieentwicklungen schnell und unkompliziert eingesetzt werden können. Eine Folge der Nutzung von PC-ähnlichen Rechnern ist die Verwendung von prozessorlosen Cratecontrollern, die über geeignete Hilfsmittel mit dem Bus des Rechners gekoppelt werden.

Bei den notwendigen Eigenentwicklungen wurde ausschließlich der PCI-Bus eingesetzt, da dieser in (fast) allen modernen Rechnern verfügbar ist. Notwendig war die Entwicklung eines CAMAC-Controllers, der in der Lage ist, Daten aus FERA-Modulen über DMA direkt in den Speicher des Rechners zu schreiben, und eines „Synchronisations- und Diagnosemoduls", das neben der Eventsynchronisation der einzelnen Crates die Möglichkeit bietet, umfangreiche Daten über die Leistung und Auslastung des Datenaufnahmesystems selbst zu gewinnen. Diese Daten sind für die Optimierung und weitere Verbessung der Datenaufnahme unverzichtbar.

Die im Kapitel 6.4.2 gewonnenen Daten lassen vermuten, daß die nächste erreichte Beschränkung die Datenrate des Magnetbandgerätes sein wird. Ein schnelleres Gerät kann hier vorübergehend Abhilfe schaffen. Allerdings wird dann schnell die maximale Übertragungsrate des Fast Ethernet und möglicherweise die Leistungsgrenze der Prozessoren erreicht. Eine Lösung, die auch in fernerer Zukunft zum Ziel führt, ist die parallele Verwendung mehrerer Bandgeräte. Es muß auch über Möglichkeiten nachgedacht werden, die Datenmenge vor dem Transport zum Eventbuilder zu reduzieren. Eine einfache Datenkompression führt hierbei nicht zum Ziel, möglich ist nur eine Selektion nach physikalischen Gesichtspunkten (second level Trigger). Dafür sind aber eine nicht unbeträchtliche Rechenleistung und schnelle Querverbindungen zwischen den Crate-Controllern nötig.

Abbildungsverzeichnis

Literaturverzeichnis

[Ant91] G. Anton et al., Nucl. Instr. and Meth. A 310 (1991) 631.

[Alb97] D. Albers et al., Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 1652.

[Ber93] A. M. Bergdolt et al., Phys. Rev. D48, R2969 (1993)

[Ber95] L. Bertolotto et al., Phys. Lett. 345B (1995) 325.

[Bic] Bicron Corporation, Newbury, Ohio 44065, USA.

[Bit3] Model 617 Adaptor Hardware Manual, Bit 3 Computer Corporation, Minneapolis, Januar 1997.

[Bon95] A. Bondar et al., Phys. Lett. 356 (1995) 8.

[Bud76] G. I. Budker, N. S. Dikanskii, V. I. Kudalainen, I. N. Meshkov, V. V. Parkhomchuk, D. V. Pestrikov, A. N. Skrinskii, B. N. Sukhina. Particle Accelerators 7, 197 (1976).

[Cal96] H. Cal'en et al., Phys. Lett. B366 (1996) 39.

[Chia94] E. Chiavassa et al., Phys. Lett. B322, 270 (1994).

[COS95] Production of eta mesons at the COSY–11 Installation, COSY–11 collaboration, Annual Report 1995, IKP, Forschungszentrum Jülich, Germany, Jül-3200, Feb. 1996, p. 39.

[Daw97] S. Dhawan, R. Hubbard, T. Radway, R. Summer, Preliminary Specification for FASTCAMAC, (URL: http://www.yale.edu/fastcamac).

[Dom97] H. Dombrowski et al., Nucl. Instr. and Meth. A 386 (1997) 228.

[Dro96] M. Drochner, Aufbau eines flexiblen Datenaufnahmesystems für das GEM-Experiment am Jülicher Beschleuniger COSY und Messungen der Reaktion pp $\rightarrow \pi^+$d nahe der Reaktionsschwelle (Dissertation), Jül-3218, Jülich (1996).

[Emi] Thorn Emi Electron Tubes Ltd., Ruislip, Middlesex, England.

[Erv92] W. Erven et al., IEEE, Trans. Nucl. Sci. 39(4) (1992) 853.

[Erv97a] W. Erven, P. Wüstner, A. Ackens, K Zwoll, Berichte zum Datenerfassungssystem für physikalische Experimente — PCI Synchronisationsmodul V 2.0, ZEL, Forschungszentrum Jülich (1997).

[Erv97b] W. Erven, H. Lövenich, K. Zwoll, Berichte zum Datenerfassungssystem für physikalische Experimente — CAMAC-Controller mit FERA-Bus und PCI-Interface V 3.0, ZEL, Forschungszentrum Jülich (1997).

[Ess92] H. G. Essels et al., GOOSY VME System Description, Gesellschaft für Schwerionenforschung GSI, Darmstadt (1992).

[EXA90] EXB–8500 Cartridge Tape Subsystem, User's Manual, EXABYTE Corp., Boulder, Colorado 80301 (1990).

[ISO90] International Organization for Standardization, ISO9506 — Manufacturing Message Specification (1990).

[ISO93] International Organization for Standardization, ISO/IEC 26.11458 — VICbus (1993).

[Joc92] M. Jochmann, S. Fuß, K.-D. Müller, R. Reinartz, „A New Sixteen Channel Leading Edge Discriminator for Time-Of-Flight Experiments at COSY“ in Conference Record of the 1992 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Vol. 1, p. 362-364 (Oktober 1992), Orlando, Florida.

[Köh95] M. Köhler et al., Die Silizium-Pad-Detektoren im Experiment COSY–11, Jül–3071, Jülich (1995).

[LeC] LeCroy Corporation, Research Systems Division, Chestnut Ridge.

[Mee72] S. van der Meer, CERN/ISR, P.O./72-31 (1972).

[Mos98] P. Moskal, The Reaktion $pp \to pp\eta'$ Close to Threshold; Ph.D. thesis; Krakau (1998).

[Oel88] W. Oelert et al., COSY Proposal No. 11, IKP–KFA (1988).

[OMG96] The Common Object Request Broker: Architecture and Specification, Revision 2.0, OMG 1996.

[PCI95] PCI Special Interest Group, PCI Local Bus Specification Revision 2.1, 2575 NE Kathryn Street 17, Hillsboro, Oregon, USA (1995).

[PCI95a] PCI Industrials Computers Manufacturers Group, CompactPCI Specification Revision 1.0, Wakefield MA 01880, 301 Edgewater Place, USA (1995).

[PDG97] R.M. Barnett et al., Physical Review D54, 1 (1996) und Update 1997 (URL: http://pdg.lbl.gov/).

[Povh97] Povh, Rith, Scholz, Zetsche, Teilchen und Kerne, Springer-Verlag (1997).

[Siem98] Siemens AG, V23814-K1306 Parallel Optical Link, Preliminary Data Sheet, Januar 1998

[STR97] Struck Fastbus Interface, Documentation, Dr. B. Struck, Tangstedt, Januar 1997.

[Sch95] U. Schuberth, The Reaction $pp \to pp\eta$ Close to Threshold (Dissertation), Uppsala 1995.

[Wol93] M. Wolke, Ein großflächiger Szintillationsdetektor mit Matrix–Auslese für Experimente an COSY, Jül–2852, Jülich (1993).

[Wol97] M. Wolke, Schwellennahe assoziierte Strangeness-Erzeugung in der Reaktion $\mathrm{pp} \to \mathrm{ppK^+K^-}$ am Experiment COSY–11 (Dissertation), Jülich (1997).

[Zwo94] K. Zwoll at al., „Flexible Data Acquisition System for Experiments at Cosy“, IEEE Trans. Nucl. Sci., 41(1), pp 37–44, 1994.

Tabellarischer Lebenslauf

Name:	Peter Wüstner
Geburtsdatum:	25. Juni 1961
Geburtsort:	Leipzig
Eltern:	Lothar Wüstner Gertrud Wüstner, geb. Pasquay
Geschwister:	Elke Wüstner
Familienstand:	ledig

Schulbildung

Okt. 1968 – Okt. 1978	Allgemeinbildende Polytechnische Oberschule in Leipzig
Nov. 1978 – Aug. 1980	Erweiterte Oberschule in Leipzig
August 1980	Abitur

Wehrdienst

Okt. 1980 – Okt. 1983	Flugzeugmechaniker im Jagdfliegergeschwader 9 in Peenemünde

Studium

Nov. 1983 – Aug. 1987	Studium der Physik an der Technischen Universität Dresden (Spezialisierung: Physikalische Grundlagen der Kernenergetik/Kerntechnik)
Sep. 1987 – März 1988	Diplomarbeit zum Thema „Vervollständigung und Test des Sicherheits– und Übertragungssystems am intensiven Neutronengenerator INGE–1“
März 1988	Diplomverteidigung
März 1988 – Aug. 1991	Forschungsstudium an der TU Dresden zum Thema „Statistische Auswertung von Messungen zur Kernfusion in kondensierter Materie“

wiss. Tätigkeit

Okt. 1991 – Sep. 1994	Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungszentrum Jülich, Zentrallabor für Elektronik
Okt. 1994 – Jan. 1998	Anstellung als wissenschaftliche Hilfskraft im Forschungszentrum Jülich, Zentrallabor für Elektronik

Meinen besonderen Dank möchte ich aussprechen:

Herrn Prof. Dr. Walter Oelert für die Möglichkeit, im Rahmen des Experiments COSY–11 und mit Hilfe seiner wohlwollenden Betreuung diese Arbeit anfertigen zu können sowie für zahlreiche Anregungen zu deren Gestaltung.

Herrn Dr. Klaus Zwoll für seine Geduld und auch gerechtfertigte Ungeduld, langen nutzbringenden Diskussionen über neue Datenaufnahmesysteme sowie die Möglichkeit, die Resourcen seiner Abteilung ständig nutzen zu können.

Herrn Prof. Dr. Halling für ein geduldiges und stets motivierendes Interesse am Fortgang dieser Arbeit.

Herrn Dr. Magnus Wolke für Diskussionen über Datenaufnahme, „Schleusengleichungen“ und gefundene und nicht gefundene Mesonen, sowie für tatkräftige Unterstützung bei der Gewöhnung an LaTeX.

Den Herren Dr. Dieter Grzonka, Dr. Thomas Sefzick und Georg Schepers für viele wertvolle Hinweise und geduldige Antworten auf nicht immer geduldige Fragen.

Herrn Dr. Jan Balewski für die notwendige Unterstützung bei der Einarbeitung in die Programme zur Datenauswertung.

Herrn Dr. Matthias Drochner für die gemeinsame Arbeit an der EMS-Software und ausführliche Hinweise zu Kommasetzung.

Den Herren Willi Erven, Heinz Loevenich und Axel Ackens für Entwicklung und Aufbau des Synchronisationsmoduls unter Berücksichtigung immer neuer Sonderwünsche.

Der COSY-Betriebsmannschaft, die stets und fast immer erfolgreich bemüht ist, einen exzellenten Protonenstrahl zur Verfügung zu stellen.

Der COSY–11-Kollaboration für ein fast familiäres Arbeitsklima zu jeder Tages-, Nacht-, Strahl-, Sommer- und Winterzeit.

Natürlich haben sich noch zahlreiche weitere Personen um das Entstehen dieser Arbeit verdient gemacht, die oben genannten sind daher nur als besonders herausragende Einzelbeispiele zu betrachten. Auch all den anderen gilt mein herzlicher Dank.