4.6 Die Erzeugung von Anregungsfunktionen aus den Daten der Doppelhelix

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie über Summen und Differenzen von Zahlenpaaren aus der links- und rechtsgewickelten Helix, Anregungsfunktionen in einem "Histogramming Memory" abgespeichert werden können. Zum besseren Verständnis wird dazu eine sehr vereinfachte Darstellung des Datenflusses benutzt. Im Anhang C ist die Elektronik sehr detailliert beschrieben und kann als Anleitung zum Aufbau verwendet werden.

Bevor auf die Einzelheiten des Datenflusses eingegangen wird, werden erst noch einmal kurz die Vorzüge dieses unabhängigen Datenaufnahmesystems genannt:

1. Die Geschwindigkeit, mit der Ereignisse auf ein "Exabyte" geschrieben werden können, ist auf Zählraten in der Größenordnung 5 kHz beschränkt. Bei einer Nutzzählrate von 50 kHz in Phase 1 des Experiments werden damit nur 10% aller Ereignisse verarbeitet. Die Datenaufnahme über den ECL-Ausgang des PCOS Systems kann dagegen 50 kHz Zählrate verarbeiten. Mit dieser Rate werden Energie- und Winkelinformationen in ein "Histogramming Memory" geschrieben.

2. Man erhält bereits <u>während der Messung</u> Anregungsfunktionen mit hoher Winkel- und guter Energieauflösung. Diese schnelle Analyse der Daten aus der inneren Lage hat den entscheidenden Vorteil, daß eine unmittelbare Beurteilung und Optimierung der Messung möglich wird.

3. Zusammen mit den Informationen aus der äußeren Lage erhält man ein redundantes System, mit dem mögliche Fehlfunktionen verschiedener Detektorkomponenten schnell gefunden werden können.

Für das Verständnis des Datenflusses genügt es, sich auf den kinematischen Zweig zu beschränken. Ausgehend von Gleichung (4.5.19) gilt, unter Vernachlässigung von Fallunterscheidungen, folgende Korrelation zwischen den Differenzen von Fasern aus links- und rechtsgewickleter Helix:

$$(l_1 - r_1) \cdot (l_2 - r_2) = c\ \gamma^2 \qquad (4.6.1)$$

Die Konstante c enthält Parameter, die die Geometrie der Doppelhelix festlegen. Der Lorentzfaktor γ ist durch die Einschußenergie nach (A3) festgelegt.

Die Elektronik muß also zunächst aus den Fasernummern Differenzen bilden und diese anschließend miteinander vergleichen. Ausgehend von einem idealen Ereignis erzeugt PCOS je zwei Fasernummern aus der links- und rechtsgewickelten Helix, die mit l_1,l_2,$r_1$und r_2 bezeichnet sind. Die verwendeten Module, mit denen eine Prüfung der kinematischen Korrelation möglich ist, stammen bis auf das "Histogramming Memory" alle aus der sogenannten EC-Line Serie [ECL 92] der Firma Le Croy. Die Module dieser Serie wurden dazu entwickelt, die Informationen aus Drahtkammern in die Triggerentscheidung miteinzubeziehen. Dabei können arithmetische Operationen, logische Vergleiche und beliebige komplexe Zusammenhänge, wie z.B. die Kinematik der zu untersuchenden Reaktion, programmiert werden. Die Module können sich untereinander verständigen, so daß je nach Anwendung parallele oder serielle Datenflüsse erzeugt werden können. Die Taktfrequenz beträgt 10 MHz und ermöglicht damit die Verarbeitung sehr hoher Datenraten.

Das erste Modul in der Elektronik ist ein sogenannter "Data Stack", der im Prinzip ein Datenspeicher ist. Durch eine geschickte logische Nummerierung der "Receiver" Module des PCOS Systems kann erreicht werden, daß in einem "Stack" nur die Wörter der linksgewickelten Helix, und in einem zweiten "Stack" nur die Wörter aus der rechtsgewickelten Helix abgespeichert werden. Im ersten Schritt werden also die Wörter l_1,l_2,$r_1$und r_2, die das PCOS System erzeugt, nach linker- und rechter Helix getrennt.

Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau der Elektronik:

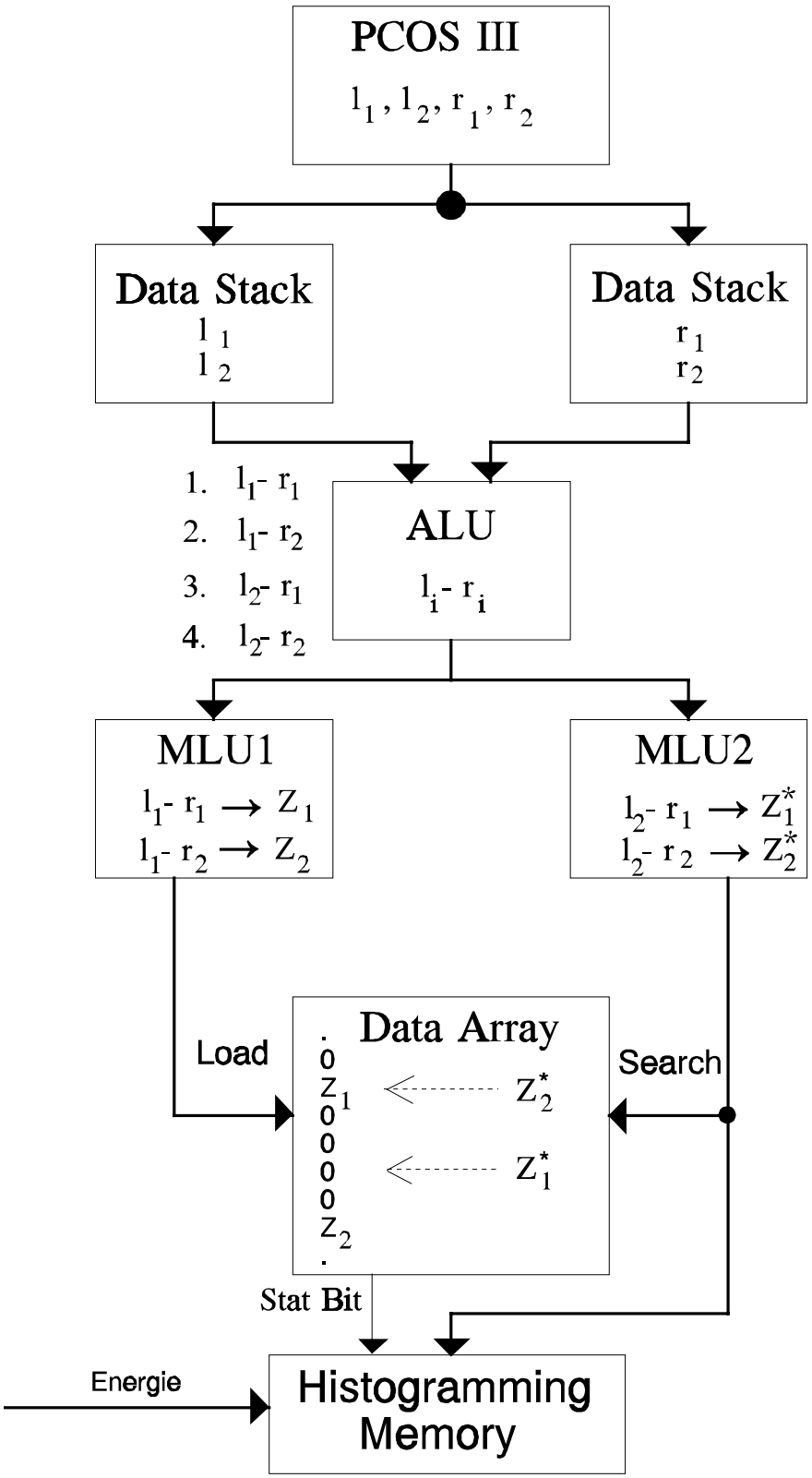

Abb. 4.17 Aufbau der Elektronik zur Prüfung der kinematischen Korrelation

Im nächsten Schritt werden in einer **A**rithmetical **L**ogical **U**nit (ALU) die Differenzen l_i - r_i (i = 1,2), mit der in der Abbildung 4.17 angegebenen Reihenfolge, berechnet. Damit liegen die zum Test auf kinematische Korrelation notwendigen Differenzen bereits vor. Diese müssen nun in einer geeigneten Weise aufbereitet und zum Vergleich gebracht werden.

Die 4 Differenzen laufen parallel in zwei **M**emory **L**ookup **U**nits (MLU). Bei einer MLU definiert ein bis zu 16 Bit breites Wort am Eingang eine Adresse in einem Speicher, deren zuvor programmierter Inhalt an den Ausgang gegeben wird. Auf diese Weise können beliebig komplexe Zusammenhänge abgebildet werden. In der MLU1 werden die Differenzen über die Beziehung (siehe auch 4.5.14 und 4.5.15)

$$z = b \frac{\pi}{N} (l - r) \tag{4.6.2}$$

auf den zugehörigen z-Wert abgebildet, der dann am Ausgang der MLU1 anliegt. In der MLU2 wird über die Beziehung (4.6.1) eine Vorhersage auf die in MLU1 erzeugten z-Werte gemacht, die durch den Index "*" gekennzeichnet sind. Wenn das Ereignis die kinematische Korrelation erfüllt, muß eine der beiden Vorhersagen Z_1^* oder Z_2^* mit Z_1 oder Z_2 aus der MLU1 identisch sein. Da die Differenzen parallel durch die MLU's laufen, und die beiden Differenzen 1 und 2 mit den beiden Differenzen 3 und 4 verglichen werden müssen, erfolgt der eigentliche Vergleich in zwei Zyklen.

Im ersten Zyklus, dem sogenannten "Load Mode", werden die z-Werte der MLU1 in das "Data Array" geladen. Dabei wird ein Bit an der durch die z-Adresse definierten Stelle auf 1 gesetzt. Nach dem Ende des "Load Mode" sind also 2 Bits entsprechend den Werten Z_1 und Z_2 auf 1 gesetzt, alle anderen Bits stehen auf 0.

Im zweiten Zyklus, dem sogenannten "Search Mode", wird an den durch die vorhergesagten Z^*-Werte definierten Adressen geprüft, ob das entsprechende Bit auf 1 sitzt. Ist z.B. die Paarung (l_1-r_1) und (l_2-r_2) die Richtige, so ist an der durch Z_2^* definierten Adresse das Bit auf 1 gesetzt, während es an der durch Z_1^* definierten Adresse auf 0 sitzt. Wenn an der gesuchten Adresse das Bit auf 1 sitzt, wird ein "Status Bit" erzeugt, das die kinematische Korrelation des Ereignisses bestätigt. Dieses "Status Bit" triggert das

"Histogramming Memory", das dann den zugehörigen Z^*-Wert der MLU2 zusammen mit der aktuellen Energieinformation abspeichert.

Für den Aufbau des koplanaren Zweigs der Elektronik benötigt man eine zusätzliche ALU, 2 MLU's und ein zweites "Data Array", in dem auf analoge Weise die Koplanarität über die Summe der Fasernummern geprüft wird. Man erhält dadurch zwei "Status Bits", die zur Koinzidenz gebracht werden müssen und so ein Ereignis definieren, das beide Korrelationen erfüllt. Die vollständige Elektronik zeigt die Abbildung C10 im Anhang C auf Seite 114.

Das "Histogramming Memory" basiert auf einem 16K RAM, das als 16K mit 24 Bit pro Adresse oder 32K mit 12 Bit pro Adresse konfiguriert werden kann. Wegen der hohen Zählrate wird das "Histogramming Memory" in der Konfiguration mit 24 Bit pro Adresse verwendet. In jeder Adresse, die durch den Wert der Einschußenergie und den des Streuwinkels definiert ist, können damit bis zu 2^{24} = 16.7 Millionen Ereignisse abgespeichert werden. Werden alle Adressen gleichmässig aufgefüllt, so können theoretisch bis zu $16384 \cdot 2^{24} = 2.7 \cdot 10^{11}$ Ereignisse abgespeichert werden. Bei einer Zählrate der elastischen Proton-Proton Streuung von 50 kHz, könnten damit die Daten von etwa 63 Tagen ununterbrochener Messung gespeichert werden. Selbst im realistischen Fall, in dem keine gleichmäßige Füllung stattfindet, ist die Kapazität dieses Speichers kein beschränkender Faktor bei der Datenaufnahme. Da man an der Erstellung von Online-Anregungsfunktionen interessiert ist, wird das "Histogramming Memory" nach jeder Beschleunigungsrampe ausgelesen.

Für die Aufteilung von Winkel- und Energieinformation stehen 14 Bit zur Verfügung. Eine mögliche Einteilung wäre z.B 9 Bit für die Einschußenergie und 5 Bit für die Winkel. Bei einem Energiebereich von 2.25 GeV entspricht dies einer gemittelten Energieauflösung von ΔE = 4.4 MeV und einer mittleren Winkelauflösung von $\theta_{cm} = 1.3^o$. Es ist aber auch jede beliebige andere Einteilung möglich, so daß jederzeit eine optimale Anpaßung an die experimentelle Situation möglich ist.

4.7 Test der Elektronik zur Überprüfung der kinematischen Korrelation

Die Elektronik des kinematischen Teils wurde zusammen mit dem PCOS System auf folgende Weise getestet:

Auf einem PC wurde das Phasenraumsimulationsprogramm FOWL [CER 70] implementiert, das bei Vorgabe von Projektilenergie, Projektilmasse und Ejektilmassen, die Impulskomponeneten aller Ejektile berechnet. Aus den Impulskomponenten der Ejektile können die getroffenen Fasernummern in der Doppelhelix berechnet werden, die dann als "Testpattern" in PCOS geladen werden. Über den Druckerausgang des PC's wird anschließend ein Triggerpuls an den PCOS "Controller" übermittelt, der die Überprüfung der "Testpattern", nach der in Kapitel 4.6 beschriebenen Weise, auf ihre kinematische Korrelation startet. Da die Information über die Strahlenergie für den Test der Triggerelektronik keine Bedeutung hat, wurde die Einschußenergie konstant auf 1.5 GeV gesetzt. Für eine konstante Projektilenergie erhält man dann im "Histogramming Memory" die Winkelverteilung der simulierten Reaktion. Für diese Simulation wurde mit einer Doppelhelix aus zwei Einzellagen, mit N = 256 Kanälen pro Wicklung, gerechnet. Die MLU's wurden so programmiert, daß der Energiebereich von 0.5 GeV bis 2.5 GeV abgedeckt wird. Dadurch bleiben nach der Zusammenfassung benachbarter Rauten, 52 getrennte logische Kanäle zur Darstellung der Winkelverteilung übrig. Für kleinere Energiebereiche, in denen die kinematische Korrelation erfüllt sein muß, ist die Winkelaufteilung entsprechend feiner. Bei einem Intervall von z.B. 1.5 GeV bis 2.5 GeV bleiben nach der Zusammenfassung 120 logisch getrennte Kanäle übrig. Entsprechend besser wird dann auch die Unterdrückung der inelastischen Reaktionen.

Die folgende Abbildung 4.18 zeigt den Aufbau des kinematischen Teils der Elektronik mit allen "Strobe-" und Verzögerunsleitungen. Da das "Histogramming Memory" mit TTL Pulsen arbeitet, muß noch ein ECL-TTL Konverter zwischen MLU2 und "Histogramming Memory" geschaltet werden.

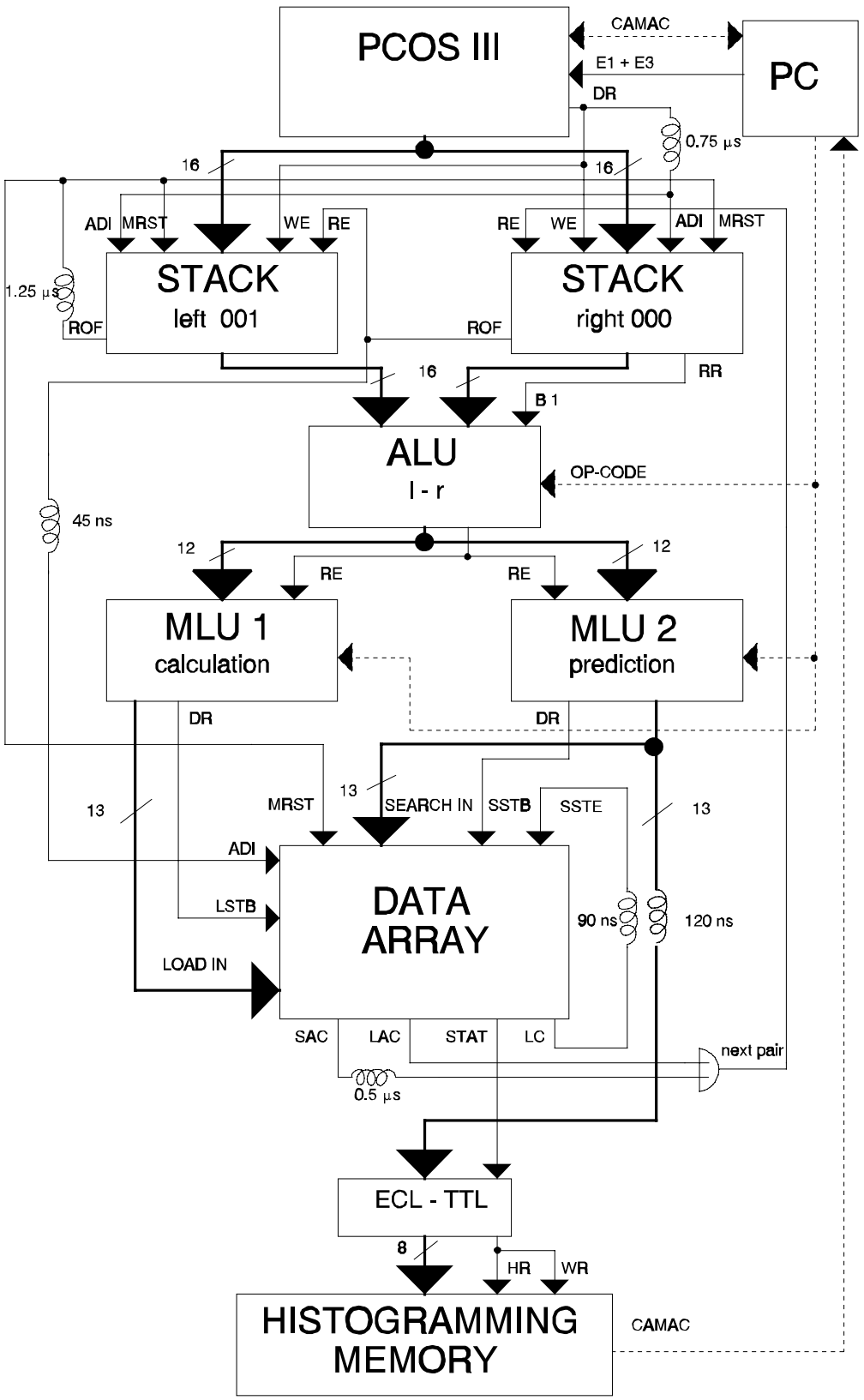

Abb. 4.18 Kinematischer Teil der Elektronik

Das Phasenraumsimulationsprogramm FOWL erzeugt eine im c.m. System isotrope Verteilung, d.h. $d\sigma/d\Omega_{cm}$ ist konstant. Im kinematischen Teil der Elektronik wird nur die Korrelation der z-Werte überprüft und es wird über den Azimutwinkelbereich von 2π integriert. Im "Histogramming Memory" entspricht das einer Darstellung von $d\sigma/d\theta_{lab}$. Für äquidistante $\Delta\theta_{cm}$ Intervalle liefert FOWL folgende Verteilung für die elastische Proton-Proton Streuung:

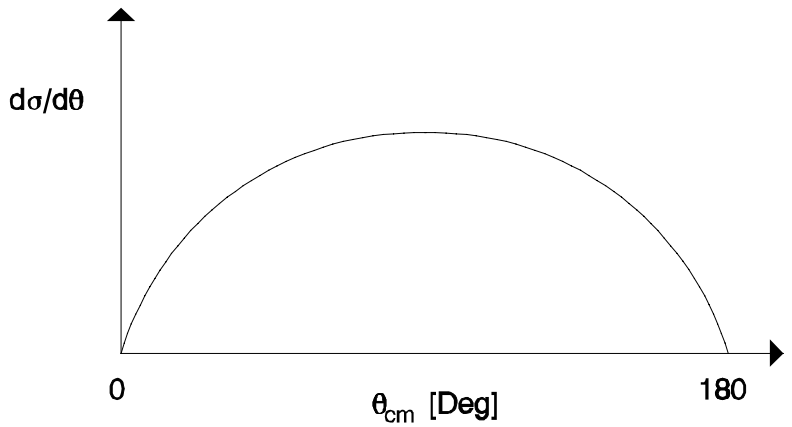

Abb. 4.19 $d\sigma/d\theta_{cm}$ Verteilung einer im c.m.-System isotropen $d\sigma/d\Omega_{cm}$ Verteilung

Nach einer Transformation ins Laborsystem erhält man eine Verteilung, die ihr Maximum im symmetrischen Winkel θ_s hat:

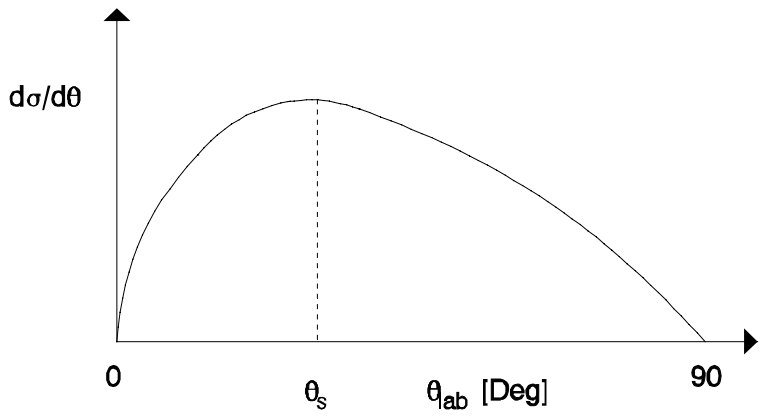

Abb. 4.20 $d\sigma/d\theta_{lab}$ Verteilung einer im c.m.-System isotropen $d\sigma/d\Omega_{cm}$ Verteilung

Mit dieser Verteilung wurden die "Test-Pattern" in PCOS gesetzt und anschließend im kinematischen Teil der Elektonik auf ihre kinematische Korrelation überprüft. Durch die Zusammenfassung benachbarter Rauten der Doppelhelix geht die Äquidistanz der Winkelintervalle verloren. Außerdem ist in der Darstellung der Verteilung im "Histogramming Memory" die Histogram Adresse dem z-Abstand vom Target proportional, d.h. für große z-Werte liegen kleine Winkel vor. Durch diese beiden Effekte wird die Winkelverteilung von Abbildung 4.20 verzerrt und man erwartet folgende Verteilung im "Histogramming Memory":

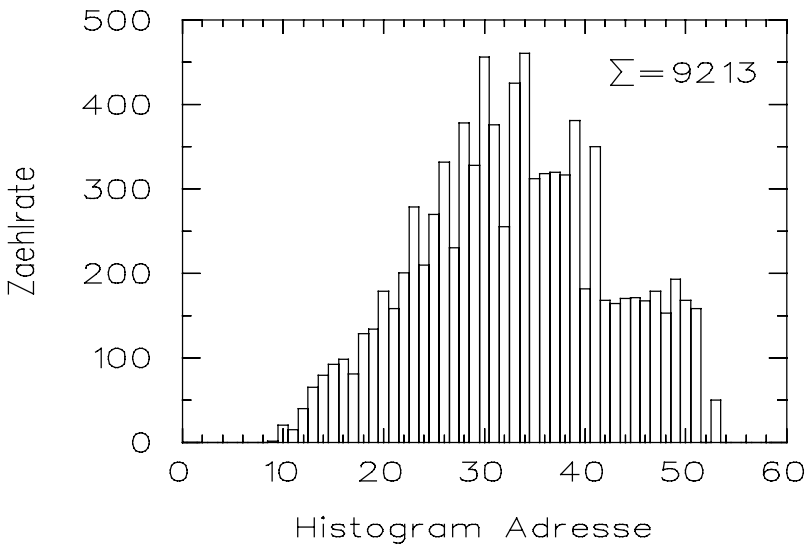

Abb. 4.21 Simulation des "Histogramming Memory" Inhalts für den Fall, daß alle elastisch gestreuten Protonen richtig zugeordnet werden.

Die Histogram Adressen auf der x-Achse entsprechen einer z-Einteilung gemäß der Zusammenfassung von benachbarten Rauten in der MLU1. Die Sprünge an der Adresse 31, 34 und 42 sind eine direkte Folge der logischen Zusammenfassung, die zu sprunghaften Änderungen des abgedeckten Raumwinkels führt. Die Verteilung 4.21 ist im wesentlichen eine spiegelverkehrte und etwas verzerrte Abbildung der Verteilung 4.20.

Simuliert wurden 10000 Ereignisse, von denen 9213 die innere Lage erreichten. Bei der in Abbildung 4.21 erwarteten Verteilung im "Histogramming Memory" wurde davon ausgegangen, daß alle die innere Lage erreichenden, elastisch gestreuten Proton-Proton Ereignisse, mit ihrer korrekten Zuordnung gefunden werden.

Legt man nun die tatsächlich erhaltene Verteilung des "Histogramming Memorys" über diese ideale Verteilung, so erhält man folgendes Bild:

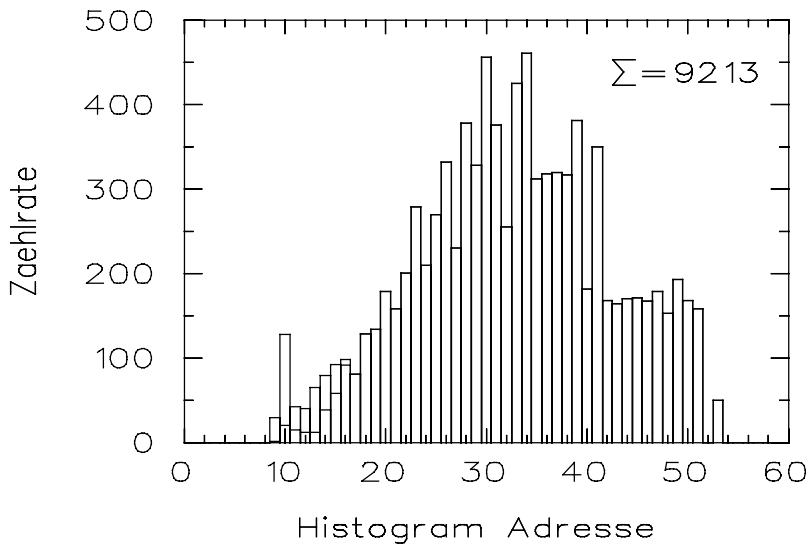

Abb. 4.22 Überlagerung von idealem Histogram und realem Histogram

Man erkennt, daß für kleine Histogram Adressen, also große Laborwinkel, Abweichungen auftreten, während für kleine Winkel beide Histogramme exakt übereinanderliegen. Das liegt daran, daß die falsche Paarung die kinematische und koplanare Korrelation nicht gemeinsam erfüllt. Betrachtet man nur die kinematische Korrelation, so sind offensichtlich falsche Paarungen möglich, die die Korrelation erfüllen. Daß die falsche Paarung immer bei kleinen Histogram Adressen diese Korrelation erfüllt, hat folgenden Grund:

Das "Histogramming Memory" wird mit Daten aus der "Prediction" MLU2 versorgt, d.h. es werden Vorhersagen abgespeichert. Bei einer Vorhersage auf große Laborwinkel, also kleine z-Werte wird also nicht immer die richtige Paarung gefunden. Da für große z-Werte viele benachbarte Rauten zu einer logischen Einheit zusammengefaßt werden, ist die Wahrscheinlichkeit dort am größten, daß bei einer Vorhersage auf die entsprechend kleinen z-Werte eine falsche Paarung gefunden wird.

Verwendet man allerdings zusätzlich die Informationen des koplanaren Zweigs der Elektronik, so liegen simuliertes und reales Histogram an jeder Stelle exakt übereinander.

Zur Demonstration der Effizienz, mit der inelastische Reaktionen in der vollständigen

Elektronik nach Abbildung C10 unterdrückt werden, sind auf der nächsten Seite die Winkelverteilungen der inelastischen Reaktionen pp→dπ^+ und pp→pnπ^+ dargestellt.

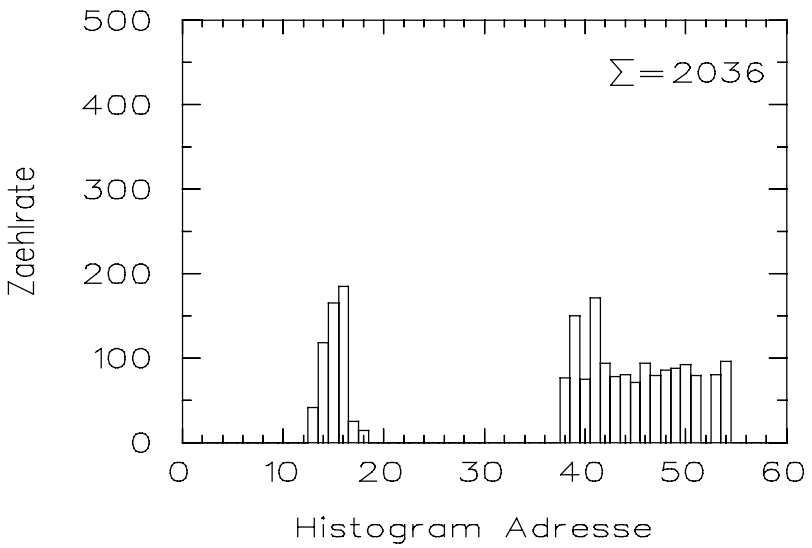

Abb. 4.23 Winkelverteilung im "Histogramming Memory" für die Reaktion pp→dπ^+

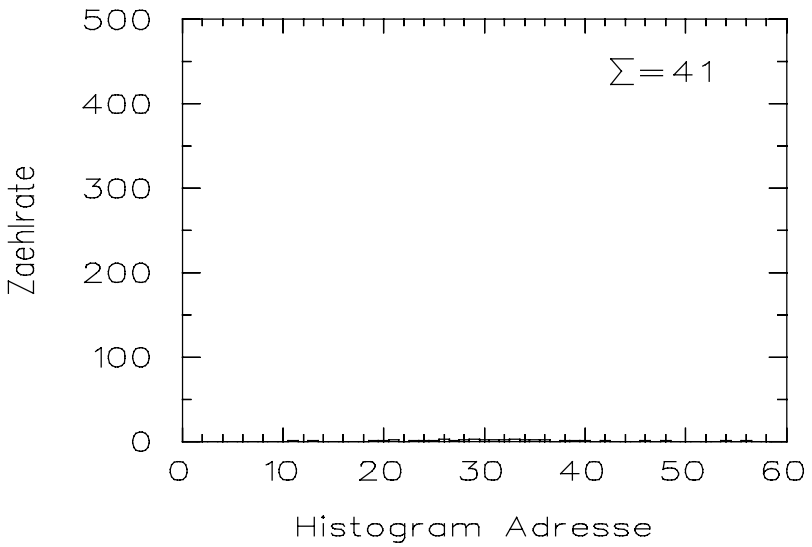

Abb. 4.24 Winkelverteilung im "Histogramming Memory" für die Reaktion pp→pnπ^+

Für die Reaktion $pp \rightarrow d\pi^+$ ist die Unterdrückung erwartungsgemäß nicht so effizient, da diese Reaktion ebenfalls koplanar ist. Dagegen bleiben in der Reaktion $pp \rightarrow pn\pi^+$ von 10000 Ereignissen nur 41 übrig. Dabei ist der totale Wirkungsquerschnitt noch nicht berücksichtigt. Simulationen aller relevanten inelastischen Reaktionen, einschließlich der quasielastischen Reaktionen am Kohlenstoff, unter Berücksichtigung der totalen Wirkungsquerschnitte, haben gezeigt, daß der integrale Untergrund über die ganze Winkelverteilung kleiner als 3% ist. Der Hauptanteil kommt dabei von den quasielastischen Reaktionen am Kohlenstoff.

Die Winkelverteilungen bzw. Anregungsfunktionen, die man mit dieser Elektronik bereits während der Messung erhält, bestehen damit zu 97% aus elastischen Proton-Proton Reaktionen. Damit ist man in der Lage, das Experiment permanent zu kontrollieren und mögliche Fehlfunktionen schnell zu erkennen. Insbesondere können auf diese Weise beobachtete mögliche Resonanzen durch eine schnelle Nachmessung mit feinerer Energieeinteilung auf ihre "Echtheit" überprüft werden.

Um die maximale Rate zu bestimmen, mit der Daten in das "Histogramming Memory" geschrieben werden können, wurde ein Pulsersignal auf 4 "Front Panel" Eingänge der "Receiver" Module gegeben. Die Eingänge wurden so gewählt, daß sie einem elastisch gestreuten Proton-Proton Ereignis entsprechen. Die Pulserrate wurde anschließend solange erhöht, bis das "Status Bit" nicht mehr generiert wurde. Die Grenzfrequenz liegt bei nichtstatistischen Ereignissen bei 500 kHz, so daß man erwarten kann, statistische Ereignisse bis zu 50 kHz ohne Totzeiten verarbeiten zu können. Der beschränkende Faktor ist das "Histogramming Memory", das 500 ns zum Lesen eines Wortes benötigt.