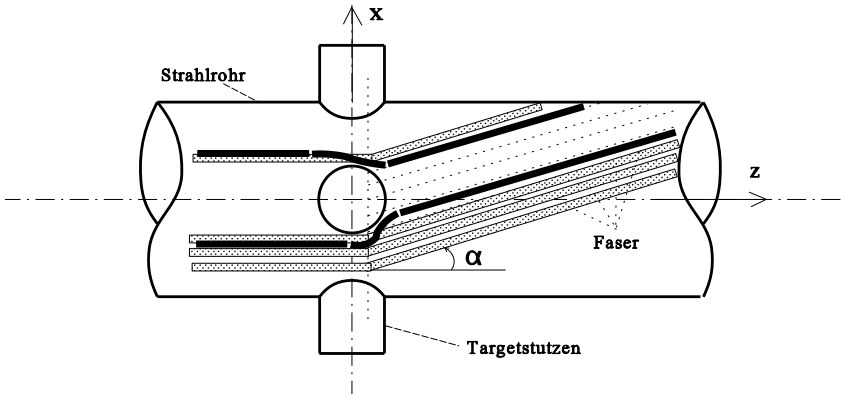

Abb. 4.14 Schematische Darstellung des EDDA-Strahllrohrs und der 1. linksgewickelten Lage der Doppelhelix im Targetbereich; in 4 Azimutwinkelbereichen müssen die Fasern der Doppelhelix zwischen den Targetstutzen hindurchgeführt werden

Auf diese 4 Trägerrohre werden die insgesamt 640 szintillierenden Fasern aufgeklebt und strahlaufwärts, d.h. in Richtung großer Streuwinkel θ_{LAB} ausgelesen[13]. Der Verlauf der Fasern von der Doppelhelix zu den Photomultipliern kann dadurch aber im Bereich der 4 Targetstutzen nicht geradlinig ausgelegt werden (s. Abb 4.14). Ungefähr 240 Fasern müssen mit mehreren Krümmungen 'stromlinienförmig' um die Stutzen geführt werden, wodurch einerseits die geometrische Akzeptanz der Doppelhelix eingeschränkt wird und andererseits Lichtverluste an den gebogenen Stellen der Fasern auftreten. Durch die Wahl eines geeigneten Fasertyps und der Entwicklung eines 'schonenden' Biegeverfahrens der Fasern können sowohl die Lichtverluste als auch Akzeptanzverluste auf ein akzeptables Maß reduziert werden, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird.

4.5.2 Szintillierende Fasern der Doppelhelix

Szintillierende Fasern[14] bestehen aus einem Plastikszintillatorkern (dem sog. '**Core**'), der von einer dünnen Acryl-Schutzschicht (das sog. '**Cladding**') umhüllt ist. Um das optische Übersprechen zwischen 2 Fasern zu verhindern, wird auf die Fasern der Doppelhelix eine weitere Schicht, das **EMA** (= Extra Murual Absorber), aufgetragen[15]. Das im Core erzeugte

[13] Der Grund liegt darin, daß die Einzelzählraten unter großen Rückwärtswinkeln ($\theta_{LAB} > 90°$) im EDDA-Experiment im Vergleich zu den Zählraten bei $\theta_{LAB} < 10°$ wesentlich kleiner sind, so daß auch die Zahl der zufälligen Koinzidenzen bei strahlaufwärts ausgelesenen Fasern kleiner wird (s. Abschnitt 4.4, speziell Abb. 4.11).

[14] Die Firmen Bicron, Kuraray und die französische Firma Optectron [OPT] sind die führenden Hersteller von szintillierenden Fasern.

[15] Das EMA hat zusätzlich die wichtige Aufgabe das Cladding vor äußeren Einflüßen zu schützen. Fasern ohne EMA erleiden z.B. durch den Kontakt Cladding-Klebstoff Lichtverluste von bis zu 80% [DOR92].

Szintillatorlicht und die Lichtleitung zum Photomultiplier erfolgen durch Totalreflexion an der Grenzschicht Core-Cladding und hängen damit vom Verhältnis der Brechungsindizes des Cores n_{Core} (≈ 1.6) und des Claddings n_{Clad} (≈ 1.42-1.48) ab. Die Brechungsindizes ihrerseits sind von der chemischen Zusammensetzung abhängig und unterscheiden sich von Fasertyp zu Fasertyp.

Wie in Abbildung 4.14 zu erkennen ist, müssen im EDDA-Experiment 240 Fasern um die 4 Targetstutzen geführt werden, da die Fasern der Doppelhelix strahlaufwärts ausgelesen werden. Ohne die Entwicklung eines thermoplastischen Biegeverfahrens[16] wäre ein solcher Faserverlauf nicht realisierbar. Die Aufgabe beim Biegen der Fasern besteht nun darin, möglichst wenig Lichtverluste bei einer möglichst 'stromlinienförmigen' Führung der Fasern um den Stutzen zu erlangen. Dies garantiert einerseits eine hohe Zahl an Photoelektronen und damit eine hohe Effizienz, andererseits geringe Verluste in der Akzeptanz der Doppelhelix. Eine Reihe von Untersuchungen ([DOR93], [ZIE93], [ENG93]) zeigte, daß nur Fasern mit 2.5 mm Durchmesser aufgrund der hohen Lichtausbeute für den Bau der Doppelhelix in Frage kommen. Wie sehr sich jedoch die Photoelektronenzahlen von 2 gleichartig gebogenen Fasern (∅ = 2.5 mm) verschiedener Hersteller unterscheiden, ist in Abbildung 4.15 dargestellt.

Abb. 4.15 Gemessene Photoelektronenzahlen von Fasern mit 2.5 mm Durchmesser der Firmen Bicron und Kuraray; im Abstand von 500 mm wurden die Fasern mit 2 Krümmungen (Krümmungsradien ≈ 5 mm, Krümmungswinkel ≈ 60°) versehen, die auch im Faserverlauf der Doppelhelix auftreten (s. Abb. 4.11); der Abstand 600 mm - 1100 mm entspricht dem Bereich der Doppelhelix; durch Verschieben einer ^{90}Sr-Quelle konnte der Abstand zwischen dem Durchgang der Elektronen durch die Faser und dem Photomultiplier variiert werden

Man erkennt, daß die Fasern der Fa. Bicron aufgrund der geringen Photoelektronenzahlen nicht den Anforderungen der Doppelhelix genügen. Der Fasertyp, der für den Bau der Doppelhelix am besten geeignet ist, wird von der Fa. Kuraray hergestellt und trägt die

[16] [ENG93]; der Hersteller KURARAY garantiert eine verlustfreie Funktion der Faser nur für Krümmungsradien größer als 1200 mm. Testmessungen für Krümmungsradien von 450 mm, die den Krümmungsradien der Schraubenlinien der Doppelhelix entsprechen, ergaben aber auch keine meßbaren Lichtverluste [ENG93], so daß die Fasern ohne spezielle Maßnahmen auf die Trägerrohre geklebt werden können.

Bezeichnung **SCSF-81 new clad**.

Für das erste Teilmodul der Doppelhelix, das aus 60 individuell gebogenen Fasern für den Bereich eines Stutzens fertiggestellt worden ist, können 2 wichtige Aussagen getroffen werden. Die erste Aussage schließt sich an die obigen Betrachtungen über den Lichtverlust bzw. die Transmissionswerte von gebogenen Fasern an. In Abbildung 4.16 sind die Transmissionswerte der Fasern dargestellt, die mit maximal 3 Krümmungen stromlinienförmig um einen Stutzen geführt werden. Die Lage und Breite des Stutzens beträgt $\varphi \pm \Delta\varphi = 0° \pm 10°$. Die Transmission einer ungebogenen Faser entspricht 100%. Da auch die Fasern, die nicht direkt am Stutzen vorbeigeführt werden, einen sog. 'Normknick' erhalten (s. Abb. 4.14), werden keine Werte von 100% erreicht. Die Biegewinkel und Biegeradien der Fasern und

Abb. 4.16 Gemessene, relative Transmission von Fasern im Bereich eines Targetstutzens für alle 4 Lagen der Doppelhelix (100 % entspricht der Transmission einer ungebogenen Faser); die Mitte des Targetstutzens liegt bei $\varphi = 0°$ und die Breite beträgt $\Delta\varphi = \pm 10°$. Jeder Meßpunkt ist der Faser zuzuordnen, die bei einem ungestörten Verlauf entlang der Schraubenlinie bei z=0 mm einen Azimutwinkel φ besitzen würde. Die Fasern außerhalb des Stutzenbereiches ($|\varphi| > 10°$) verlaufen ebenfalls nicht geradlinig (s. Abb.4.14), weshalb die Transmission hier kleiner 100% ist.

damit die Transmission der Fasern sind rechts und links des Stutzens unterschiedlich, da der Winkel α (s. Abb. 4.14) ungleich Null ist. Dies führt zu der Asymmetrie um $\varphi = 0°$ (s. Abb. 4.16). Die minimale Transmission beträgt bei allen 4 Lagen ca. 50 %, was bei Verwendung von Vielkanalphotomultipliern (s. Abschnitt 4.5.3) mindestens 10 Photoelektronen entspricht.

An diesem ersten Teilmodul kann auch die geometrische Akzeptanz der Doppelhelix abgeschätzt werden[17]. Dazu wird der Bereich des Moduls, bei dem die Fasern nicht mehr dem helixförmigen Verlauf folgen, ausgemessen. Die Fehler betragen ca. $\Delta x \approx \Delta y \approx \pm 1$ mm. Die Punkte, bei denen die Fasern nicht mehr der Schraubenlinie folgen, sind in Abbildung 4.17 in Abhängigkeit des Streuwinkels θ und des Azimutwinkels φ eingetragen. Der Bereich unterhalb der Punkte entspricht dem Raumwinkelbereich, den die Doppelhelix abdeckt, d.h. der geometrischen Akzeptanz der Doppelhelix.

Abb. 4.17 Die an einem Targetstutzen gemessenen Punkte (φ, θ_{LAB}), bei denen der Verlauf der Fasern von der Schraubenlinie abweicht (jeder Meßpunkt ist einer Faser zugeordnet); der Bereich unterhalb der Punkte entspricht der geometrischen Aktzeptanz der Doppelhelix. Im Bereich des Targetstutzens (durchgezogene Linie) ergeben sich für jede Lage unterschiedliche Akzeptanzverluste.

Man erkennt in Abbildung 4.17, daß die Akzeptanz bzgl. des Azimutwinkels φ der ersten beiden Lagen der Doppelhelix bis $\theta_{LAB} = 70°$, im ungünstigen Fall (4. Lage) bis $\theta_{LAB} = 67°$, für die elastische Proton-Proton Streuung 100% beträgt. Ungefähr 2/3 aller Fasern decken einen Streuwinkelbereich bis $\theta_{LAB} = 72°$ ab, was auch dem maximalen Streuwinkel entspricht,

[17] Die exakte Bestimmung der Akzeptanz der Doppelhelix kann nur im eingebauten Zustand und mit Hilfe der Außenschale erfolgen. Hierfür ist eine hohe Strahlenergie notwendig, damit die im Winkelbereich von 72° sehr niederenergetischen Protonen auch beide Detektorschalen vollständig durchdringen können.

den die Außenschale abdeckt.

4.5.3 Die Photomultiplier der Doppelhelix

Jede Faser der Doppelhelix mit einem Einkanalphotomultiplier auszulesen, ist aus Platz- und Kostengründen nicht möglich. Die insgesamt 640 Fasern auf eine entsprechend geringe Zahl an Einkanalphotomultipliern zu 'routen', ist wegen der Mehrdeutigkeiten bei der Rekonstruktion eines Ereignisses nicht sinnvoll[18]. Die für die Doppelhelix realisierbare Lösung stellen Multianoden-Photomultiplier dar. In diesem Photomultipliertyp ist die Kathode des Multipliers in mehrere Segmente, sogenannte Pixel aufgeteilt. Am Ende der Sekundärelektronenvervielfachungskanäle befindet sich entsprechend der Pixelzahl der Kathode dieselbe Anzahl von Anoden, so daß einem Anodenausgang genau einem Pixel zugeordnet werden kann. Führt man auf ein Pixel genau eine Faser, so erhält man die gewünschte 1 zu 1 Zuordnung zwischen Fasernummer und Photomultiplierkanal.

Die Entwicklung von kompakten Multianoden-Photomultipliern ist noch im Fluß. Die Schwierigkeiten bei der Konzeption eines solchen Photomultipliertyps entstehen durch die hohe Kanalzahldichte und der damit verbundenen, gegenseitigen Beeinflussung der Vervielfachungskanäle. Zudem erreicht man mit den bisher entwickelten Multianoden-Photomultipliern noch nicht die Quanteneffizienz (QE) von Einkanalphotomultipliern[19].

In mehreren Untersuchungen wurden verschiedene Multianoden-Photomultipliertypen getestet ([JOO93], [ZIE93]). Das Ergebnis dieser Studien zeigt, daß der Multianoden-Photomultiplier R4760 der Firma Hamamatsu [HAMA] zum Auslesen von 2.5 mm großen Fasern am besten geeignet ist. Er vereint bei einer gemeinsamen Hochspannungsversorgung 16 unabhängige Sekundärelektronenvervielfachungskanäle. Die Quanteneffizienz liegt wie bei allen Vielkanalphotomultipliern im Bereich von 15 %. Die maximale spektrale Empfindlichkeit der Bialkali-Kathode liegt bei 420 nm und ist damit gut an das Emissionspektrum der szintillierenden Faser SCSF-81 angepaßt. Der Vorteil dieses Multipliertyps liegt in einem sehr geringen Übersprechen (< 0.5%), was im Falle der Doppelhelix in zweifacher Hinsicht günstig ist. Zum einen werden keine Ereignisse in einem

Nachbarkanal vorgetäuscht. Andererseits wird durch ein geringeres Übersprechen die Zahl der Photoelektronen bzw. die Zahl der Elektronen, die auf die 1. Dynode ausgelöst treffen, größer

[18] Das Routen der Fasern der Doppelhelix ist problematisch, denn schon ein einziges Teilchen trifft beim Durchgang durch eine Lage mehrere benachbarte Fasern. Die Rekonstruktion eines einzigen Durchstoßpunktes wird dadurch sehr aufwendig und bei einer Reaktion mit mehr als einem Teilchen im Ausgangskanal mehrdeutig.

[19] Eine zukünftige Alternative sind Vielkanal-Avalanchedioden, die zur Zeit nur als Prototypen verfügbar sind. Hier nutzt man die sehr hohe Quanteneffizienz (QE ≈ 80%) von Halbleitern aus und erreicht dadurch eine wesentlich höhere Nachweiswahrscheinkeit von Ereignissen, die wenige Photonen in der Faser erzeugen ([ABB93], [DSAL92], [ATA92], [VGEE91], [KIR87]).

da praktisch keine Photonen bzw. Photoelektronen in benachbarte Kanäle gestreut werden[20].

4.5.4 Die 'Front-End' Elektronik der Doppelhelix

Der Durchstoßpunkt eines Teilchens in der Doppelhelix wird nur aus den Nummern der getroffenen Fasern rekonstruiert. Eine Analyse des Pulshöhenspektrums zur besseren Ortsauflösung ('Amplitudenteilung' s. Abschnitt 1.2) ist aufgrund der hohen Granularität der Doppelhelix nicht nötig. Daher werden die analogen Pulse der Doppelhelix schon unmittelbar am Detektor über Diskriminatoren in logische Pulse konvertiert. Der Kanal einer getroffenen Faser wird somit logisch auf '1' gesetzt, der einer nicht getroffenen Faser bleibt auf dem Pegel '0'.

Weiterhin ist die Zahl der Fasern, die bei einer Reaktion mit wenigen Teilchen im Ausgangskanal getroffen werden, klein gegenüber der Gesamtzahl der Fasern der Doppelhelix. Für eine solche Reaktion sämtliche Kanäle der Doppelhelix auszulesen, würde die Datenmenge ohne Informationsgehalt erheblich vergrößern (in ca. 98% der Kanäle würde eine '0' stehen). Man benötigt deshalb eine Front-End Elektronik, die nur die Nummern der getroffenen Fasern weiterverarbeitet und alle nicht getroffenen Fasernnummern verwirft (Nullunterdrückung bzw. 'zero-supression').

Das PCOS III - System (= **P**roportional **C**hamber **O**perating **S**ystem der **III**. Generation) der Firma LeCroy erfüllt genau diese Anforderung. Es wurde ursprünglich zur Auslese von Vieldrahtkammern entwickelt und wird im EDDA-Experiment als Ausleseelektronik der Doppelhelix verwendet (s. Abb. 4.15 und Anhang B). Das PCOS-System setzt sich aus folgenden Modulen (Originalbezeichnungen) zusammen:

- 16 channel Chamber Card 2735 PC
- 32 channel PCOS-Delay and Latch Modul 2731A
- PCOS-Crate Readout Controller 2738
- Data Buffer and CAMAC-Interface Controller 4299

In einem PCOS-Crate lassen sich maximal 736 Kanäle verarbeiten[21]. Ein PCOS-Crate besteht aus einem normalen CAMAC-Überrahmen mit einem PCOS-Controller und mindestens einem PCOS-Latch. Im Falle der 640 Fasern der Doppelhelix werden 20 PCOS-Latches (20 Module · 32 Kanäle/Modul = 640 Kanäle) und nur ein PCOS-Controller benötigt.

Neben dem modularen und kompakten Aufbau des Systems ist die hohe Verarbeitungs-

[20] Auch in der Außenschale kommt dieser Multipliertyp zum Einsatz; die Halbringe unter großen Streuwinkeln bestehen z.T. aus szintillierenden Fasern und werden über den Multianoden-Multiplier R4760 ausgelesen [DOH93]

[21] Man hat mit diesem System die Möglichkeit, über einen Controller bis zu 16 sogenannter 'dedicated' CAMAC-Crates, d.h. insgesamt 11776 Kanäle, auszulesen.

geschwindigkeit für das EDDA-Experiment vorteilhaft. Die Zyklen auf dem Datenbus des PCOS-Crates sind mit 10 MHz getaktet (= 100 ns pro auszulesenden Kanal) und damit ca. 10 mal so schnell wie die normalen CAMAC-Datentransferraten. Desweiteren besteht die Möglichkeit, computer-gesteuert alle Diskriminatorschwellen und Verzögerungen in feinen Schritten einzustellen. Die Option, bei einem Hit in mehreren benachbarten Fasern nur den Schwerpunkt der Fasernummern (der sog. 'cluster-mode') zu erhalten, vermindert die Datenmenge und erleichtert zudem die Datenanalyse. In Abbildung 4.18 ist schematisch die

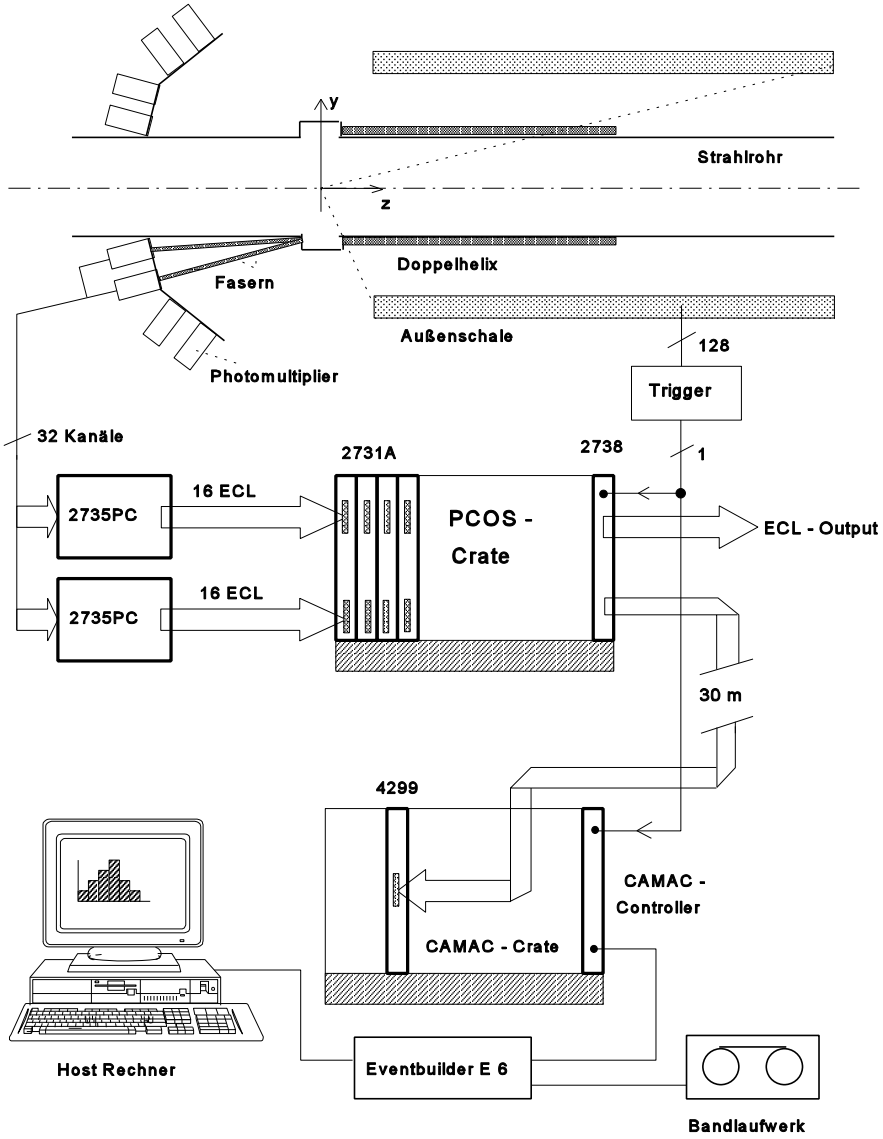

Abb. 4.18 Schematische Darstellung der Doppelhelix und der Ausleseelektronik; die Pulse der Doppelhelix, die über die Vorverstärker- und Diskriminatorkarte 2735PC im PCOS-Latch 2731A gespeichert werden, können über 2 verschiedene Bussysteme (ECL-Bus; Databus) des PCOS-Controllers 2738 weiterverarbeitet werden; der Trigger, der einen Auslesezyklus im PCOS-Controller initiiert, wird von der Außenschale generiert

Doppelhelix, die Front-End Elektronik sowie wichtige Teile des Datenaufnahmesystems

dargestellt, um das Konzept der Datenverarbeitung der Doppelhelix zu veranschaulichen. In Abbildung 4.19 erkennt man den gesamten Aufbau des EDDA-Detektors am internen Targetplatz TP2 von COSY. Die Fasern der Doppelhelix werden strahlaufwärts in Richtung der schalenförmigen Photomultiplierhalterung ausgelesen.

Abb. 4.19 Der komplett installierte EDDA-Detektor am internen Targetplatz TP2 des Beschleunigers COSY