Diese Verteilung ist verglichen mit der von Abbildung 4.2 deutlich schmaler. Für die Zahl der zu erwartenden Photoelektronen erhält man analog den Überlegungen zur normalen Wicklung folgendes Bild:

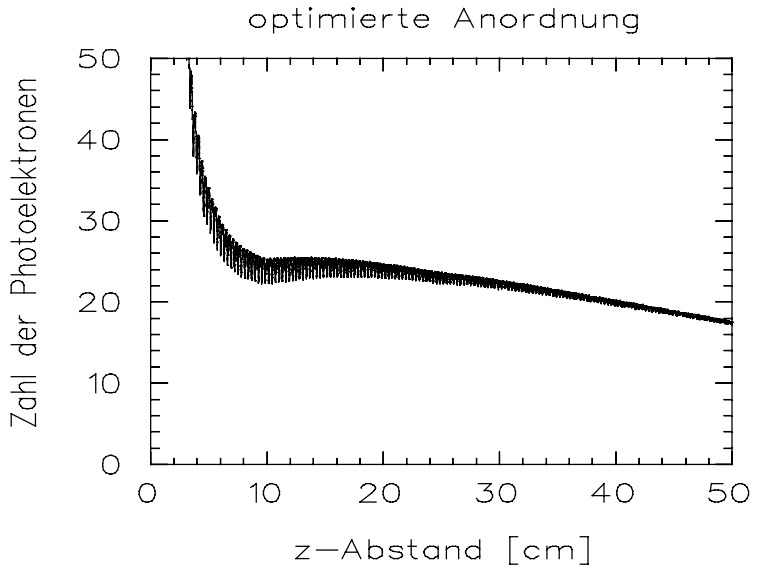

Abb. 4.6 Verteilung der zu erwartenden Photoelektronen in einer optimierten zweilagigen Wicklung.

Im Minimum kann man noch mit 18 Photoelektronen rechnen und selbst bei Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors von 0.5 bei der Verwendung von Vielkanalphotomultipliern kann die Diskriminatorschwelle so gesetzt werden, daß alle echten Pulse gezählt und die Rauschpulse abgeschnitten werden. Im Juni dieses Jahres wird eine auf diese Weise optimierte Anordnung aus 2.5 mm Fasern am Saturne Beschleuniger in Saclay/Paris getestet [Dor 92].

Nachdem das Konzept der Helixwicklung festliegt, können alle wesentlichen Parameter der Helix berechnet werden. Zunächst ist die Zahl der Fasern pro Lage interessant. Sie hängt vom Durchmesser der Fasern und dem Wicklungswinkel δ ab. Die Abwicklung der Zylinderoberfläche auf die Ebene verdeutlicht den Zusammenhang:

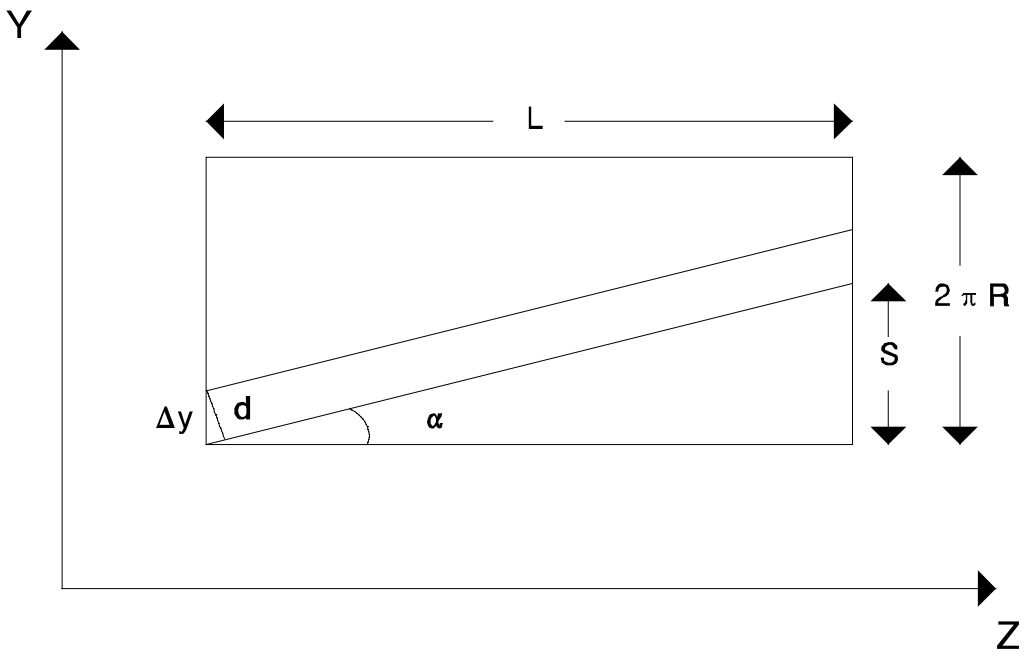

Abb. 4.7 Darstellung einer rechtsgewickelten Faser auf der Zylinderoberfläche

Es gilt:

$$S = \delta \cdot R \tag{4.3.2}$$

$$\tan \alpha = \frac{S}{L} \tag{4.3.3}$$

$$\Delta y = \frac{d}{\cos \alpha} \tag{4.3.4}$$

Wegen der relativ geringen Lichtausbeute müssen Fasern mit 2.5 mm Durchmesser verwendet werden. Berücksichtigt man noch Fertigungstoleranzen und Klebstoff zwischen den Fasern von 1/10 mm, so beträgt der effektive Durchmesser d = 2.6 mm. Der mittlere Radius der ersten Lage liegt mit einem Strahlrohraußenradius von 80 mm bei R_1 = 81.3 mm. Die innere Lage soll eine Länge von L = 500 mm haben, wobei die Fasern mit einem Wicklungswinkel von $\delta = 169{,}8^{o}$ aufgebracht werden. Mit diesen Zahlen erhält man folgende Werte:

S = 240.9 mm

α = 25.72°

Δy = 2.89 mm

Die Zahl N der Fasern für die erste Lage erhält man aus:

$$N = \frac{2\pi R_1}{\Delta y} = 177 \tag{4.3.5}$$

Bei 4 Lagen erhält man insgesamt 708 Fasern in der Doppelhelix. Durch die Kreuzung je einer Faser aus der links- und rechtsgewickelten Helix erhält man Elementarzellen in Form von Rauten mit folgenden Abmessungen:

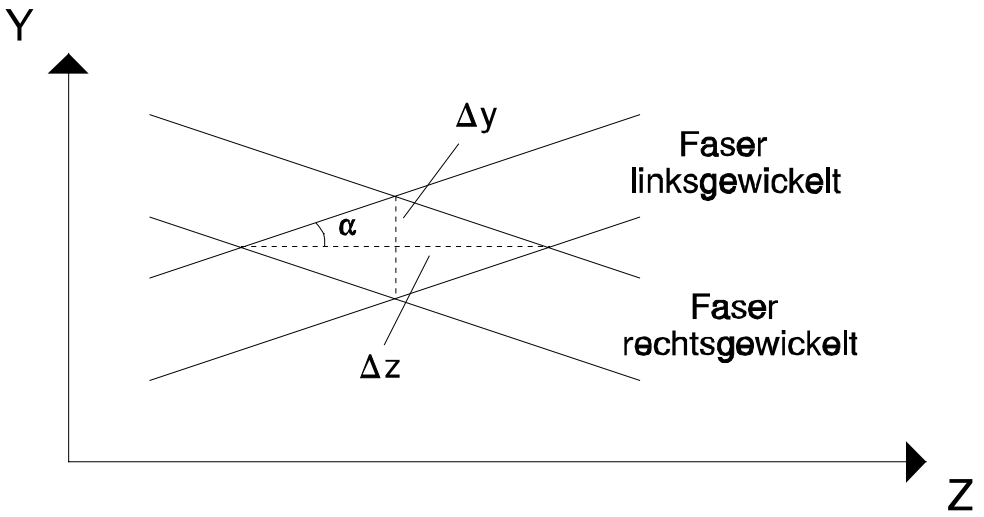

Abb. 4.8 Elementarzelle einer Doppelhelix aus zwei Einzellagen

Für die Werte Δy und Δz der Achsen gilt:

$$\Delta y = \frac{d}{\cos \alpha} = 2.9 \text{ mm} \tag{4.3.6}$$

$$\Delta z = \frac{d}{\sin \alpha} = 6.0 \text{ mm} \tag{4.3.7}$$

Üblicherweise werden die Werte für diese Elementarzellen in Standardabweichungen σ angegeben. Bei einer Raute liegt eine Dreiecksverteilung vor, bei der folgender Zusammenhang zwischen σ und halber Basisbreite Δ/2 besteht:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\Delta}{2} \tag{4.3.8}$$

Damit ergeben sich aus den Werten der Halbachsen (4.3.6) und (4.3.7) folgende Standardabweichungen:

$$\sigma_y = 0.59 \text{ mm} \tag{4.3.9}$$

$$\sigma_z = 1.22 \text{ mm} \tag{4.3.10}$$

Das ist die Auflösung einer Doppelhelix, die aus zwei einlagigen Helizes gebildet wird. In unserem Fall liegt eine Doppelhelix aus zwei zweilagigen Helizes vor, so daß sich die Auflösung um einen Faktor 2 verbessert:

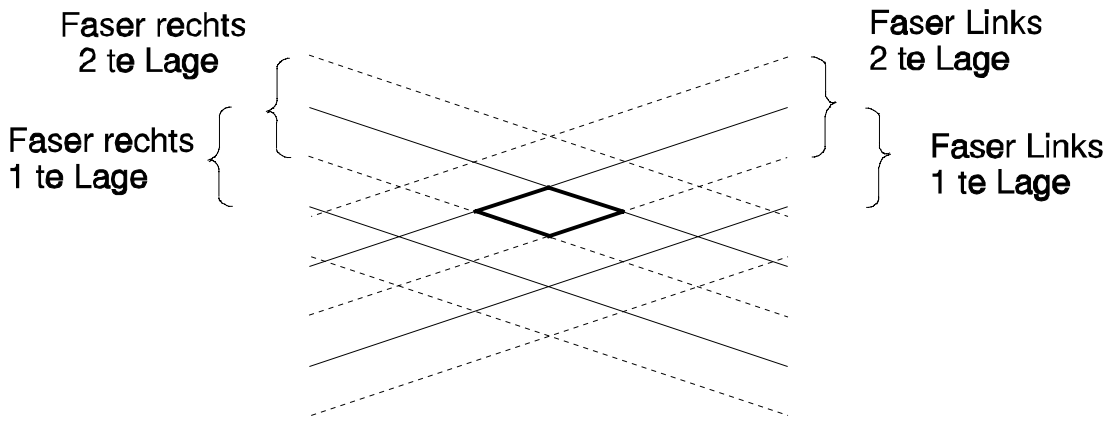

Abb. 4.9 Elementarzelle einer Doppelhelix aus zwei Doppellagen

Die Elementarzellengröße beträgt damit

$$\sigma_y = 0.30 \text{ mm} \quad (4.3.11)$$

$$\sigma_z = 0.61 \text{ mm} \quad (4.3.12)$$

Im symmetrischen Winkel (z = 114 mm bei einer kinetischen Energie von 1.5 GeV) entspricht das, bezogen auf die σ-Werte, einer Winkelauflösung von $\Delta\theta_{cm} = 0.3^o$ im Schwerpunktsystem.

Die wesentlichen Parameter der Doppelhelix sind damit bestimmt. Die Fasern sollen nur innerhalb der Doppelhelix aktiv, also szintillierend, sein. In Konsistenz mit der äußeren Lage beginnt die Helix bei z = 2.5 cm bezüglich des Targetpunktes. An dieser Stelle werden die szintillierenden Fasern mit nicht szintillierenden Fasern gleichen Durchmessers verschweißt. Diese Lichtleiter werden auf Vielkanalphotomultiplier geführt, die strahlaufwärts ringförmig um das Strahlrohr angeordnet sind. Dieser Aufbau liefert 708 analoge Signale, die mit dem im folgenden beschriebenen System PCOS III verarbeitet werden.

4.4 Die Verarbeitung der analogen Signale der inneren Lage

Von der Firma Le Croy wurde das System PCOS III zur effizienten Aufnahme von Proportional- und Driftkammerdaten entwickelt. Der Name PCOS III steht für **P**roportional **C**hamber **O**perating **S**ystem in der dritten Generation [PCO 92]. Bei der Verwendung von Drahtkammern ist zur Erreichung einer hohen Orts- und Winkelauflösung die Zahl der einzelnen Drähte sehr hoch. Da man üblicherweise die Trajektorien einzelner Ereignisse bestimmen möchte, ist die Zahl der pro Ereignis ausgelösten Drähte sehr klein. Es ist daher unsinnig, zu jedem Ereignis das vollständige "Hit Pattern" einer oder mehrerer Drahtkammern in einen Datenspeicher zu schreiben, da die meisten Informationen aus nicht getroffenen Drähten bestehen. Es ist dagegen sehr viel effektiver, nur die angesprochenen Drähte in Form von Drahtadressen abzuspeichern. Das PCOS System erzeugt diese Drahtadressen und hat die besonderen Merkmale einer hohen Integration (bis zu 736 Kanäle in einem "CAMAC Crate") und einer sehr kurzen Verarbeitungszeit.

Da in der inneren Lage 708 einzelne Kanäle zu verarbeiten sind, bietet sich PCOS in idealer Weise zur Datenaufnahme der inneren Lage an. Das System ist modular aufgebaut und besteht aus vier Komponenten:

1. 16 Kanal Vorverstärker/Diskriminatorkarte	Modell 2735 PC/DC
2. 32 Kanal Receiver Modul	Modell 2731 A
3. Crate Controller	Modell 2738
4. Buffer/CAMAC Interface	Modell 4299

Die Analogsignale der einzelnen Pixel der Vielkanalphotomultiplier werden auf die ladungsempfindlichen Eingänge der Vorverstärker/Diskriminatorkarte geführt, wo sie verstärkt und anschließend in logische ECL-Pulse konvertiert werden. Diese werden in die Receiver Module 2731A geleitet, die in einem "dedicated CAMAC Crate" sitzen. Der Name "dedicated" deutet an, das CAMAC Zyklen gegenüber einem "standard CAMAC Crate" 10 bis 15 mal schneller abgearbeitet werden. Dieser Modus wird durch den Einsatz des "Controllers" 2738 in einem "standard CAMAC Crate" erreicht. In einem solchen "dedicated CAMAC Crate" dürfen ausschließlich die "Receiver Module" 2731A eingesetzt werden. Liegt an einem von maximal 23 "Receiver" Modulen in einem Crate ein gültiges Signal an, so wird ein "**L**ook **A**t **M**e" (LAM) Signal erzeugt und der "Controller" 2738 decodiert die Kanalnummer. Diese werden dann über den Databus an das Databusinterface 4299 übermittelt, das in einem "standard CAMAC Crate" sitzt und über CAMAC Befehle ausgelesen werden kann. Eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise aller Komponenten ist im Anhang B zusammengestellt. Der "Controller 2738" stellt die Kanalnummer zusätzlich an einem ECL-Ausgang zur Verfügung, über den die Daten an die Module der sogenannten EC-Line Serie [ECL 92] übermittelt werden können. Mit den Modulen dieser Serie wurde die Elektronik zur Online-Analyse der Daten der inneren Lage aufgebaut. Eine detaillierte Beschreibung dieser Elektronik und der verwendeten Module steht im Anhang C. Eine schematische Darstellung der Vernetzung der Komponenten des PCOS-Systems zeigt die folgende Abbildung:

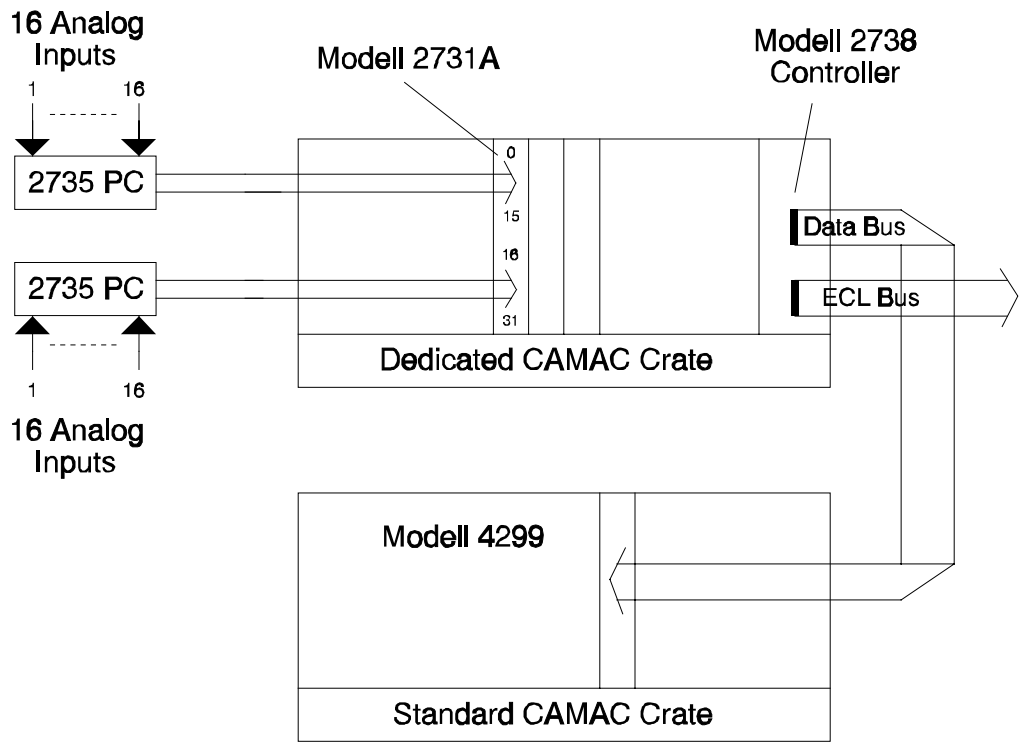

Abb. 4.10 Vernetzung der Komponenten von PCOS III

Da das System für Drahtkammersignale entwickelt wurde, muß erst geprüft werden, ob auch Photomultipliersignale verarbeitet werden können. Die Signale von Drahtkammern sind sehr viel kleiner als die Signale von Photomultipliern (PMT), so daß für jeden Kanal am Eingang der Vorverstärker-/Diskriminatorkarte 2735 PC folgendes RC Glied eingebaut werden muß:

Abb. 4.11 Eingangsbeschaltung der Karte 2735 PC

Über das Potentiometer muß der Eingangspuls soweit abgeschwächt werden, daß das Signal nach dem Vorverstärker auf der Karte 2735 PC nicht in die Sättigung läuft. Versuche haben gezeigt, daß je nach Photomultipliertyp Signalamplituden zwischen 250 und 550 mV optimal sind. Mit dieser Methode ist es auch möglich, die Vertsärkungsschwankungen innerhalb der Kanäle eines Vielkanalphotomultipliers bequem auszugleichen. Diesem Verfahren liegt dabei die Annahme zugrunde, daß die Zahl der im Mittel ausgelösten Photoelektronen keinen großen Schwankungen unterliegt, also nicht von der Position des einzelnen "Pixels" in der Röhre abhängt. Das diese Annahme gerechtfertigt ist, zeigt folgende Messung mit minimal ionisierenden Elektronen aus einer ^{90}Sr Quelle.

Eine runde 2 mm Faser wurde zunächst auf ein zentrales "Pixel" der Philips Vielkanalröhre 4702 [Phi 90] gesetzt und das Pulshöhenspektrum mit einem ADC aufgenommen. Im Anschluß wurde das Pulshöhenspektrum eines "Randpixels" mit der gleichen Elektronik aufgenommen. In einer dritten Messung wurden die Signale des "Randpixels" soweit verstärkt, daß der Abstand vom Nullkanal zum Maximum des "Peaks" gleich dem im zentralen "Pixel" ist. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse:

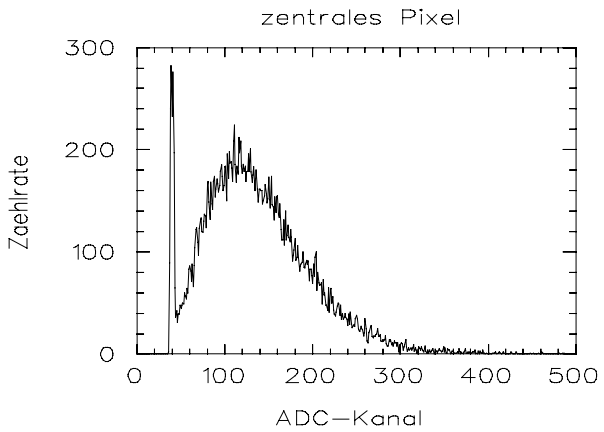

Abb. 4.12 Pulshöhenspektrum eines zentralen "Pixels".

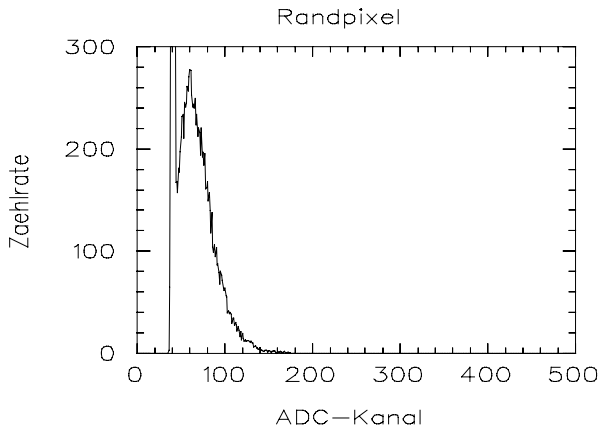

Abb. 4.13 Pulshöhenspektrum eines unverstärkten "Randpixels".

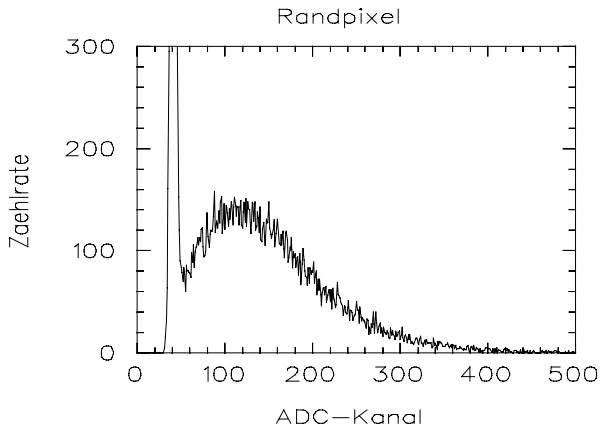

Abb. 4.14 Pulshöhenspektrum eines verstärkten "Randpixels".

Durch die Anpassung der Verstärkung erhält man relativ ähnliche Spektren, in denen eine einheitliche Diskriminatorschwelle gesetzt werden kann. Die Verhältnisse mit 2.5 mm Fasern, in Verbindung mit neu entwickelten 16-Kanal Multipliern ohne Übersprechen benachbarter Kanäle, werden voraussichtlich einen Faktor 2 bis 3 besser sein.

Stellt man das Eingangspotentiometer so ein, daß die Signalhöhe nach dem Vorverstärker 550 mV beträgt, so schneidet der Diskriminator bei einer Spannung von 1 V das Spektrum genau im Minimum zwischen Nullkanal und Peakmaximum nach unten ab. Hat man einmal eine optimale Einstellung gefunden, die den dynamischen Bereich der Diskriminatorspannung ausnutzt, so kann jedes "Pixel" individuell auf die optimale Amplitude eingestellt werden. Die Verstärkungsschwankungen der einzelnen "Pixel" einer Röhre können damit bequem ausgeglichen werden. So angepasste "Pixel" verhalten sich dann bei gleicher Diskriminatorschwelle innerhalb von 10 - 20 % gleich, d.h. der Schnitt im Pulshöhenspektrum liegt innerhalb dieser Werte an der gleichen Stelle.

Es bleibt noch anzumerken, daß die Breite der logischen Pulse am Ausgang der PCOS Karte für vernünftige Schwellen immer so groß ist, daß die Receiver Module 2731 A jeden Puls erfassen. Erst für utopisch hohe Schwellen, bei denen praktisch 75% des interessanten Peaks abgeschnitten wird, treten so kleine Pulsbreiten auf, daß das Receiver Modul nicht reagiert.

Zusammengefaßt kann gesagt werden, daß die PCOS Karte 2735 PC mit der Eingangsbeschaltung nach Abbildung 4.11 problemlos mit Photomultiplierpulsen betrieben werden kann.

4.5 Die Kinematik der elastischen Proton-Proton Streuung in der Doppelhelix

Analog zur äußeren Lage sollen auch die Informationen der inneren Lage zur Aufnahme von Anregungsfunktionen bereits während der Messung verwendet werden. Während in der äußeren Lage die Polarwinkel- und Azimutwinkelinformationen getrennt aus den Daten der Ring- und Streifenlage extrahiert werden können, liegt das grundsätzliche Problem bei einer Helix in der Kopplung von z-Koordinate und Azimutwinkel φ. Wie man beide Werte

entkoppeln kann und letztlich damit die Ereignisse auf Koplanarität und kinematische Korrelation prüfen kann, wird in diesem Kapitel gezeigt.

Für eine Schraubenlinie gilt der einfache Zusammenhang:

$$z = b \cdot \varphi \tag{4.5.1}$$

Der Parameter b beschreibt die Steigung der Kurve. Positive Werte von b definieren eine rechtsgewickelte Helix, negative Werte eine linksgewickelte Helix. Werden N Fasern zu einem "Array" zusammengelegt, das die Zylinderoberfläche vollständig bedeckt, so gilt für die Azimutwinkelauflösung der einzelnen Faser:

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \pi}{N} \tag{4.5.2}$$

Da alle Fasern bei z = 0 beginnen, werden die Fasern im Uhrzeigersinn, beginnend bei $\varphi = 0$, durchnummeriert. Linksgewickelte Fasern werden mit l, rechtsgewickelte Fasern mit r bezeichnet. Für einen beliebigen Punkt P auf der r-ten Faser einer rechtsgewickelten Helix, erhält man dann folgenden Ausdruck für den Zusammenhang von φ und z :

$$z = b \cdot (\varphi - r \cdot \Delta\varphi) \tag{4.5.3}$$

Die folgende Abbildung 4.15 verdeutlicht den Zusammenhang.

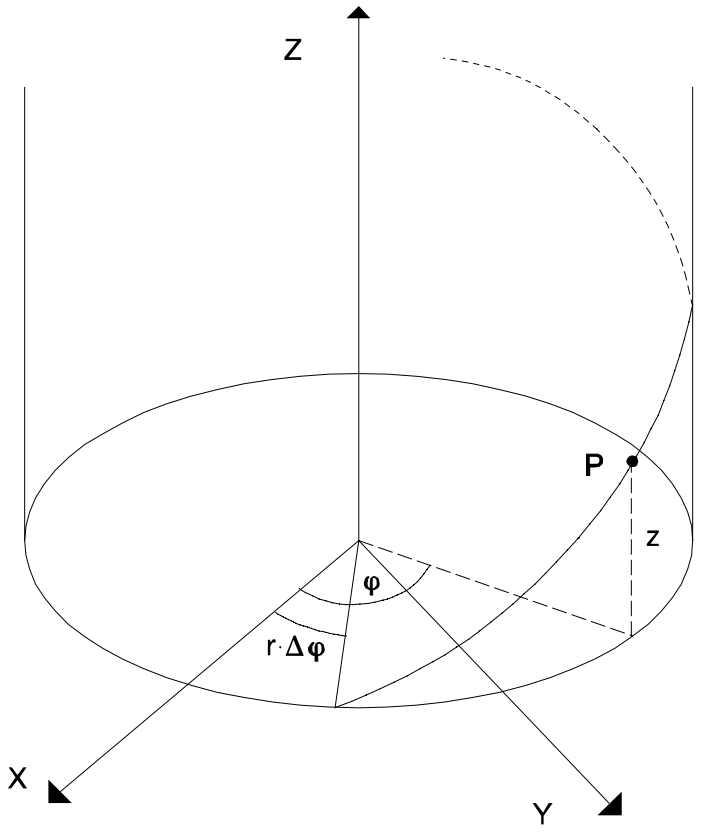

Abb. 4.15 Kopplung von φ- und z-Koordinate in der Helix

Die Fasernummern r und l laufen von 0 bis N-1 und die z-Koordinate bewegt sich im Bereich von z = 0 bis z = L, wobei L die Länge der inneren Lage ist. Den Parameter b erhält man durch folgende Überlegung. An der Stelle z = L hat jede einzelne Faser den Azimutwinkel φ überdeckt, der durch den Wicklungswinkel δ festgelegt ist. Durch Einsetzen in Gleichung 4.5.3 erhält man dann o.B.d.A für die Fasernummer r = 0 :

$$L = b \cdot \frac{\delta}{180^o} \pi$$

$$\Rightarrow \qquad b = \frac{L \cdot 180^o}{\delta \cdot \pi} \qquad (4.5.4)$$

Damit z nicht negativ wird, muß noch eine Fallunterscheidung bezüglich φ und r·Δφ getroffen werden, so daß man folgendes Gleichungssystem für die rechts- und linksgewickelte Helix erhält:

Rechtshelix:

$$z = b\cdot(\varphi - r\cdot\Delta\varphi) \qquad \varphi \geq r\cdot\Delta\varphi \qquad (4.5.5)$$

$$z = b\cdot(\varphi - r\cdot\Delta\varphi + 2\pi) \qquad \varphi < r\cdot\Delta\varphi \qquad (4.5.6)$$

Linkshelix:

$$z = -b\cdot(\varphi - l\cdot\Delta\varphi) \qquad \varphi < l\cdot\Delta\varphi \qquad (4.5.7)$$

$$z = -b\cdot(\varphi - l\cdot\Delta\varphi - 2\pi) \qquad \varphi \geq l\cdot\Delta\varphi \qquad (4.5.8)$$

Die einzige Information, die das PCOS System letzlich liefert, sind die Nummern r und l der getroffenen Fasern, bzw. deren Schwerpunkte. Ein einzelner Durchstoßpunkt liefert je eine Zahl r aus den rechtsgewickelten Fasern und eine Zahl l aus den links gewickelten Fasern, aus denen der Azimutwinkel φ und die Koordinate z bestimmt werden muß. Bildet man alle möglichen Kombinationen von Summen und Differenzen mit den Gleichungen der Rechtshelix (4.5.5 und 4.5.6) und denen der Linkshelix (4.5.7 und 4.5.8) und nutzt explizit die Randbedingungen

$$0 \leq \varphi < 2\pi \qquad (4.5.9)$$

und

$$0 \leq z < L \qquad (4.5.10)$$

aus, so erhält man nach einer längeren Rechnung folgendes Gleichungssystem:

$$\varphi = \frac{\pi}{N}(l+r) \qquad l-r \geq 0 \tag{4.5.11}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{N}(l+r+N) \qquad l-r < 0 \qquad l+r < N \tag{4.5.12}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{N}(l+r-N) \qquad l-r < 0 \qquad l+r \geq N \tag{4.5.13}$$

$$z = b \cdot \frac{\pi}{N}(l-r) \qquad l-r \geq 0 \tag{4.5.14}$$

$$z = b \cdot \frac{\pi}{N}(l-r+N) \qquad l-r < 0 \tag{4.5.15}$$

Die Größe N ist gegeben durch die Gesamtzahl der Fasern in einer Helix, z.B. für 2.6 mm Fasern ist N = 177 (siehe Gleichung 4.3.5). Solang man es nur mit einem einzigen Durchstoßpunkt zu tun hat, also nur je eine Zahl l und r existiert, bleibt die Rekonstruktion von φ und z eindeutig. Mit dem **EDDA**-Experiment soll die elastische Proton-Proton Streuung untersucht werden. Ein solches Ereignis liefert gleichzeitig zwei Durchstoßpunkte, d.h. die Doppelhelix liefert dann vier Zahlen r_1,r_2,l_1,l_2, aus denen dann φ_1,φ_2,z_1 und z_2 bestimmt werden müssen. An dieser Stelle tritt ein Problem auf, das jeder zweilagigen Anordnung eigen ist, in der gleichzeitig zwei Durchstoßpunkte auftreten. Die folgende Abbildung verdeutlicht die Situation:

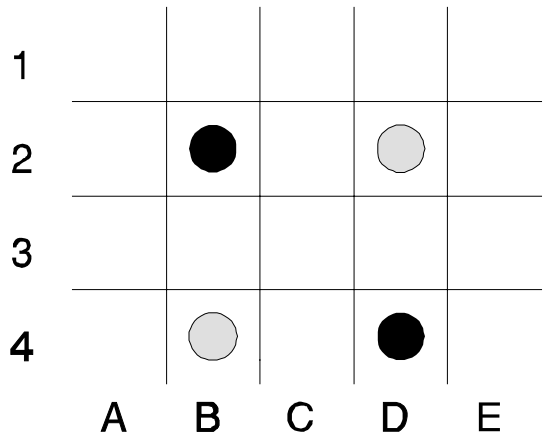

Abb. 4.16 Mehrdeutigkeit einer zweilagigen Anordnung

Sind die tatsächlichen Durchstoßpunkte durch die schwarzen Punkte mit den Koordinaten (2,B) und (4,D) gegeben, so sind allein aufgrund der Informationen der zwei "Zahlen" und "Buchstaben" auch die grauen Punkte mit den Kombinationen (4,B) und (2,D) möglich. Welche der beiden Kombinationen die richtige ist, kann ohne weitere Hilfsmittel nicht entschieden werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung einer dritten Lage, die diagonal angeordnet ist, oder man benutzt zusätzliche Informationen aus der äußeren Detektorlage.

Man kann aber auch versuchen, die besondere Kinematik der elastischen Proton-Proton Streuung als Entscheidungshilfe einzubeziehen. Diese Möglichkeit soll im folgenden untersucht werden.

Zunächst erhält man aus der Doppelhelix vier Zahlen, die entsprechend der Mehrdeutigkeit zu zwei möglichen Paaren gekoppelt werden können:

$$1. \qquad (l_1, r_1) \quad \leftrightarrow \quad (l_2, r_2)$$

oder

$$2. \qquad (l_1, r_2) \quad \leftrightarrow \quad (l_2, r_1)$$

Für die weiteren Betrachtungen über die Ausnutzung der besonderen Kinematik wird davon ausgegangen, daß die Paarung 1 die richtige ist. Tatsächlich müssen immer beide Paarungen nach dem folgenden Schema untersucht werden.

i. Koplanarität, Korrelation der φ Werte

Die drei Gleichungen (4.5.11) bis (4.5.13) beschreiben die Abhängigkeit des Azimutwinkels φ von der Summe der Zahlen aus der links- und rechtsgewickelten Helix für einen Durchstoßpunkt. Um die Koplanarität der Reaktion ausnutzen zu können, müssen die Differenzen der φ-Werte von zwei Zahlenpaaren (l_1,r_1) und (l_2,r_2) betrachtet werden. Für zwei Durchstoßpunkte erhält man sechs Gleichungen, in denen je nach Fallunterscheidung $N_1 = 0, +N, -N$ bzw. $N_2 = 0, +N, -N$ zur Summe addiert werden muß. Mit diesen sechs Gleichungen können neun mögliche

Differenzen

$$(l_1 + r_1 + N_1) - (l_2 + r_2 + N_2) = \frac{N}{\pi}\cdot(\varphi_1 - \varphi_2) \qquad (4.5.16)$$

gebildet werden. Einsetzen der Koplanaritätsbedingung

$$|\varphi_1 - \varphi_2| = \pm\pi \qquad (4.5.17)$$

liefert zwei mögliche Lösungen dieser neun Differenzen:

$$(l_1 + r_1 + N_1) - (l_2 + r_2 + N_2) = \pm N \qquad (4.5.18)$$

Für nicht koplanare Ereignisse sind alle Werte zwischen -2N und +2N möglich.

ii. Kinematische Korrelation der z-Werte

Für die kinematische Bedingung erhält man nach den Gleichungen (4.5.14) und (4.5.15) für zwei Durchstoßpunkte vier Gleichungen, aus denen vier Produkte gebildet werden können, je nachdem ob $N_1 = 0,N$ bzw. $N_2 = 0,N$ addiert werden muß. Diese Produkte unterliegen durch die Kombination von (A8) mit (4.5.14) und (4.5.15) folgender Korrelation:

$$(l_1 - r_1 + N_1)\cdot(l_2 - r_2 + N_2) = \frac{R^2\cdot\gamma^2\cdot N^2}{\pi^2\cdot b^2} \qquad (4.5.19)$$

Damit sind die Triggerbedingungen für Summe und Differenzen der Zahlen aus der Doppelhelix festgelegt.