4. Die innere Lage

4.1 Motivation

In der Phase 1 des Experiments ist die Wechselwirkungszone von **COSY**-Strahl und Target durch die Verwendung eines 8 µm CH_2 Fädchens und die relativ schmale Strahlausdehnung längs des Fädchens (σ_x = 1.2 mm) gut definiert (siehe Abbildung 2.1). Die kinematische Identifikation der Ereignisse kann damit direkt aus den Durchstoßpunkten der Ejektile in der äußeren Lage gewonnen werden.

In der Phase 2 des Experiments ist ein polarisiertes Atomstrahltarget vorgesehen, dessen räumliche Ausdehnung in der Größenordnung von 10 mm liegt. Ein besonders gravierendes Problem ist der Untergrund von Streuereignissen, die an dem unpolarisiertem H_2-Restgas in der Umgebung des polarisierten Targetstrahls stattfinden. Dazu kommt eine aufgrund der geringen Targetdicke gegenüber Phase 1 zwanzigfach reduzierte Nutzzählrate. Aus diesem Grund benötigt man in der Phase 2 des Experiments eine zusätzliche innere Detektorlage, die in Verbindung mit der äußeren Lage eine Vertexrekonstruktion erlaubt.

Diese zweite Detektorlage ist aber nicht nur für die Phase 2 des Experiments interessant, sondern sie liefert auch schon in der Phase 1 wichtige Informationen. Durch die zusätzlichen Signale erhöht sich die Zahl der Koinzidenzen, die ein gültiges Ereignis definieren und inelastische Reaktionen, sowie Streuprozesse am Kohlenstoff, können besser diskriminiert werden.

Wie in der äußeren Lage können auch aus den Informationen der inneren Lage, durch deren schnelle Analyse, bereits während der Messung Anregungsfunktionen aufgenommen werden. Durch den Vergleich beider Anregungsfunktionen erhält man ein redundantes System und ist insbesondere zu Beginn des Experiments in der Lage, eventuelle Fehler in der einen oder anderen Detektorkomponente schnell zu finden.

4.2 Die Konzeption der inneren Lage

Sinn und Zweck der inneren Lage ist die Vertexrekonstruktion, d.h. die innere Lage muß ortsauflösend sein und besteht damit aus mindestens zwei Einzellagen. Dazu kommt die Forderung, die gestreuten Protonen auf dem Weg zur äußeren Lage so wenig wie möglich zu stören. Das bedeutet, so wenig Material wie nötig zu verwenden. Voluminöse, nicht aktive, Elemente wie Photomultiplier, Lichtleiter, Kabel u.s.w. müssen also außerhalb der möglichen Trajektorien vom Target zur äußeren Lage angeordnet werden. Diese Randbedingungen legen die Konstruktion der inneren Lage als Doppelhelix aus geeignetem Material fest. Für eine gute Vertexrekonstruktion benötigt man eine hohe Granularität, so daß sich die Verwendung von szintillierenden Fasern, die über Vielkanalphotomultiplier ausgelesen werden, anbietet. Daß solche Fasern und Röhren im Prinzip die geforderten Ansprüche erfüllen, wurde in zwei Diplomarbeiten bereits gezeigt [Wie 91], [Mar 91].

Die Entwicklungen auf dem Gebiet der Fasern und Röhren sind im Fluß, so daß eine Entscheidung über den konkreten Typ von Faser und Röhre noch aussteht. Bei den Fasern erhofft man sich eine höhere Lichtausbeute, die im wesentlichen durch einen kleineren Brechungsindex des sogenannten Claddings, einem Material zum Schutz des eigentlichen Szintillators in der Faser, erreicht wird. Bei den Vielkanalphotomultipliern versucht man das Übersprechen benachbarter Kanäle zu minimieren und die Quantenausbeute der Photokathode zu vergrößern. Das zentrale Problem dieses Systems aus Faser und Röhre liegt in der Zahl der Photoelektronen, die letztlich das Signal/Rauschverhältnis und die Effizienz des Teilchennachweises bestimmen. Die Zahl der Photoelektronen ist relativ klein und man ist daher besonders empfindlich auf deren Schwankungen. Solche Schwankungen werden verursacht durch unterschiedliche, effektiv durchdrungene Szintillatordicken in der Helixwicklung und Inhomogenitäten der einzelnen Verstärkungskanäle einer Röhre. Wie man die effektiven Szintillatordicken für alle möglichen Trajektorien durch eine spezielle Anordnung von Fasern in einer Helix homogenisieren kann, wird im nächsten Abschnitt gezeigt.

4.3 Die Helixwicklung

Die Anforderungen an die Helixwicklung sind eine möglichst homogene Effizienz und eine hohe Granularität. Außerdem soll jedes der beiden Protonen aus der elastischen Streuung einen eindeutig bestimmbaren Durchstoßpunkt in der Doppelhelix erzeugen. Die Eindeutigkeit legt zunächst einmal den maximal möglichen Winkel fest, über den eine einzelne Faser abgewickelt werden darf. Die beiden Protonen der elastischen Proton-Proton Streuung sind koplanar mit dem **COSY**-Strahl, d.h. die Betragsdifferenz der Azimutwinkel beträgt immer 180°. Dies ist auch der maximale Wicklungswinkel δ, da sonst eine Faser von beiden Protonen getroffen werden kann, d.h. möglicherweise nur ein Hit von zwei Protonen erzeugt wird. Unter Berücksichtigung der Targetverschmierung und der Ausdehnung der einzelnen Faser erhält man einen maximalen Wicklungswinkel von $\delta = 170°$. Kleinere Winkel sind durchaus möglich aber nicht sinnvoll, da die z-Ausdehnung der Elementarzellen immer größer, und damit die z-Auflösung immer kleiner wird. Nachdem der Wicklungswinkel einer einzelnen Faser auf diese Weise festgelegt ist, stellt sich die Frage nach der konkreten Wicklung zu einem Array. Szintillierende Fasern sind mit rundem und quadratischem Querschnitt in den Größen 0.5 bis 3 mm Durchmesser bzw. Kantenlänge in Abstufungen von 0.5 mm erhältlich. Fasern mit quadratischem Querschnitt scheiden für die Helixwicklung praktisch aus, da bei der Abwicklung die Torsionskräfte innerhalb einer Faser zu groß werden und zum Bruch führen.

Zur Verdeutlichung der geometrischen Verhältnisse wird zunächst eine einzelne Helix betrachtet, d.h. der im folgenden verwendete Begriff zweilagig bezieht sich auf eine Helix, in der beide Lagen den gleichen Wicklungssinn haben. Legt man runde Fasern nebeneinander, so variiert die Schichtdicke für ein senkrecht durchdringendes Teilchen zwischen Null und dem Faserdurchmesser. Eine einzelne Lage besitzt daher keine homogene Effizienz und man benötigt eine zweite Lage, die um den Faserradius versetzt ist. Werden runde Fasern als Helix auf einem Zylinder abgewickelt, so erscheinen im Schnitt entlang der z-Achse Ellipsen, die folgende Anordnung haben:

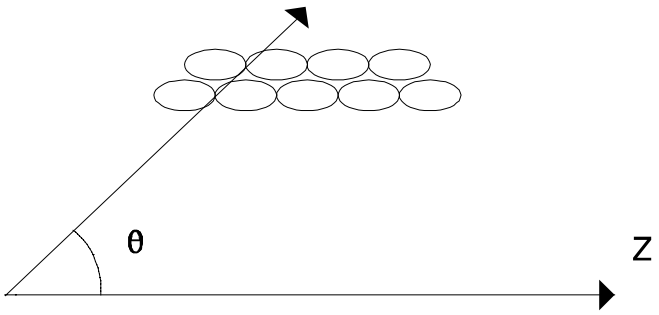

Abb. 4.1 Schnitt durch eine normale zweilagige Helixwicklung entlang der z-Achse.

Die Abbildung zeigt auch schon das Problem, daß bei einer solchen normalen, zweilagigen Anordnung für schräg durchlaufende Teilchen auftritt. Es gibt offensichtlich kritische Polarwinkel θ, bei denen die effektiv durchdrungene Szintillatorschicht sehr klein wird. Da später jede Faser einzeln ausgelesen werden soll, ist bei verschiedenen Streuwinkeln die Faser interessant, in der die größte Wegstrecke zurückgelegt wurde. Die folgende Abbildung 4.2 zeigt die effektiv durchdrungene Szintillatorschicht einer solchen Wicklung für Fasern mit 2.5 mm Durchmesser entlang der z-Achse:

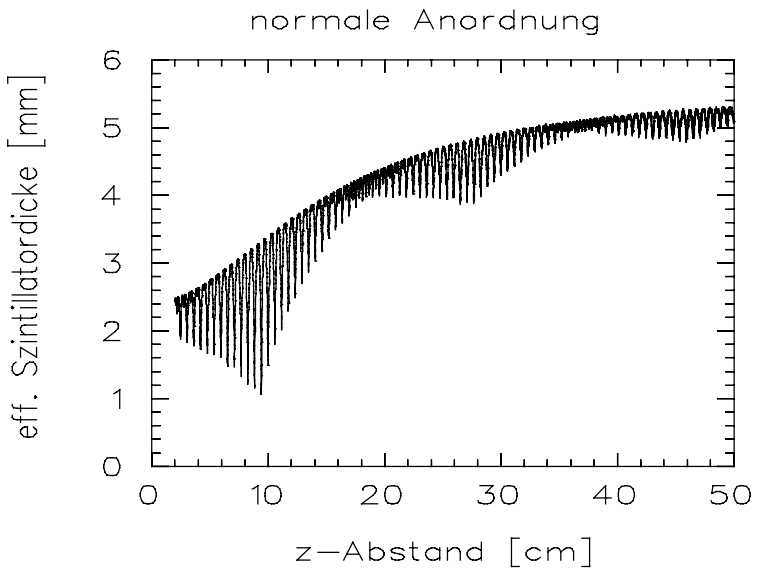

Abb. 4.2 Verteilung der effektiv durchdrungenen Szintillatorschicht in einer normalen zweilagigen Wicklung entlang der z-Achse.

Die Wegstrecke schwankt zwischen 1 und 5 mm und es stellt sich die Frage, wie sich diese Verteilung auf die Zahl der zu erwartenden Photoelektronen projeziert. Unter Berücksichtigung von Einflüssen wie Abschwächungslängen, Verluste durch Biegungen, Quantenausbeute der Photokathode und dem Energieverlust nach Bethe Bloch erhält man für die Proton-Proton Kinematik folgende Verteilung:

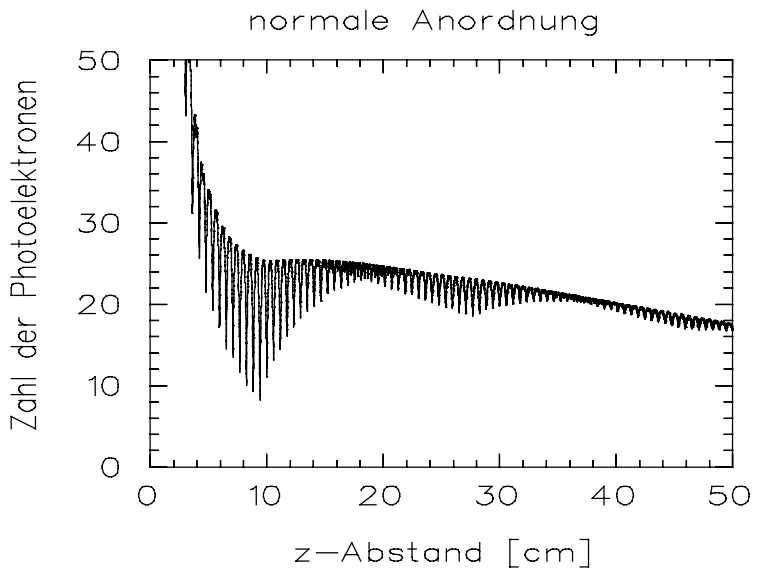

Abb. 4.3 Verteilung der zu erwartenden Photoelektronen in einer normalen zweilagigen Wicklung.

In diesem Bild sind ausschliesslich Parameter verwendet, die durch eigene Messungen mit szintillierenden Fasern BCF-12 von Bicron [Bic 89] und einem guten Einkanalphotomultiplier (HAMAMATSU Typ 1635-02) [HAM 88] bestimmt wurden. Die Zahl der zu erwartenden Photoelektronen schwankt zwischen 8 und 40, wobei die untere Grenze problematisch ist. Bei der Verwendung von Vielkanalphotomultipliern sind die Verhältnisse etwa einen Faktor 2 schlechter, so daß im ungünstigsten Fall mit nur 4 Photoelektronen zu rechnen ist. Dadurch wird die Einstellung der Diskriminatorschwelle oberhalb des Rauschens bei gleichzeitig maximaler Effizienz sehr schwierig.

Man kann dieses Problem durch eine angepaßte Verschiebung der Ellipsen der zweiten Lage durch folgende Forderung lösen: Für minimale effektive Szintillatorschichtdicken in der ersten Lage soll die effektiv durchdrungene Schichtdicke in der zweiten Lage maximal sein. Die nächste Abbildung zeigt das Prinzip:

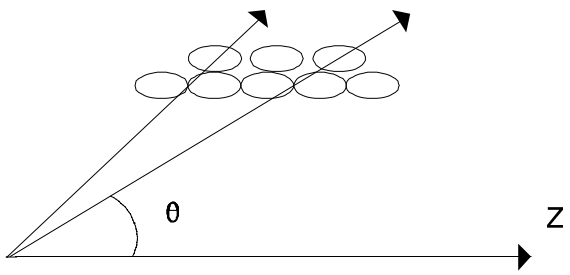

Abb. 4.4 Schnitt durch eine optimierte zweilagige Helixwicklung entlang der z-Achse

Praktisch erhält man eine solche Anordnung durch etwas unterschiedliche Wicklungswinkel δ von erster und zweiter Lage in der Helix. Aus dem Strahlensatz erhält man folgenden Zusammenhang

$$\delta_1 = \delta_2 \frac{R_1}{R_2} \tag{4.3.1}$$

Dabei sind R_1 und R_2 die radialen Abstände der beiden Lagen zur Sollachse. Mit einer so optimierten Wicklung erhält man analog folgende Verteilung für die effektiv durchlaufene Faserdicke entlang der z-Achse:

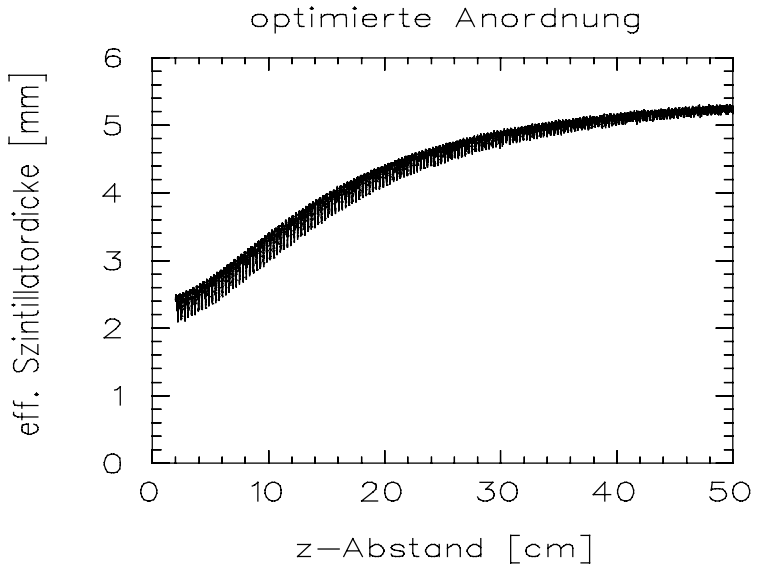

Abb. 4.5 Verteilung der effektiv durchdrungenen Szintillatorschicht in einer optimierten zweilagigen Wicklung entlang der z-Achse.