3. Die äußere Lage

3.1 Überlegungen zur Detektorgeometrie

Mit dem **EDDA**-Detektor sollen Anregungsfunktionen der elastischen Proton-Proton Streuung mit hoher Winkel- und Energieauflösung gemessen werden. Wie man durch eine Messung während der Beschleunigungsphase mit einem internen Target eine hohe Energieauflösung erreicht, wurde bereits in Kapitel 1 beschrieben. Eine gute Winkelauflösung muß durch ein geeignetes Design des Detektors erreicht werden. Wie eine an die Proton-Proton Kinematik angepaßte Segmentierung der äußeren Lage aussieht, ist Thema dieses Kapitels.

Im Laborsystem sind für die elastische Proton-Proton Streuung Streuwinkel zwischen 0^o und 90^o möglich. Es genügt also, aktive Detektorelemente strahlabwärts von der Targetposition aus einzusetzen. Die Geometrie soll so beschaffen sein, daß Konkurrenzreaktionen aus inelastischen Kanälen und, in Phase 1 des Experiments, Reaktionen am Kohlenstoff durch ein Triggersystem effizient unterdrückt werden können. Für den Aufbau des Triggersystems werden zwei Besonderheiten der elastischen Streuung ausgenutzt, die direkte Konsequenzen für den Aufbau der äußeren Lage haben.

i. Koplanarität

Die Trajektorien der beiden Protonen aus der elastischen Streuung liegen in einer Ebene mit dem Strahl. In der Projektion auf die x-y-Ebene bedeutet das, daß der Betrag der Azimutwinkeldifferenz gerade π ist.

$$| \varphi_1 - \varphi_2 | = \pi \qquad (3.1.1)$$

Der Detektor muß also in der Lage sein, die Azimutwinkel φ_1 und φ_2 mit guter Auflösung zu bestimmen.

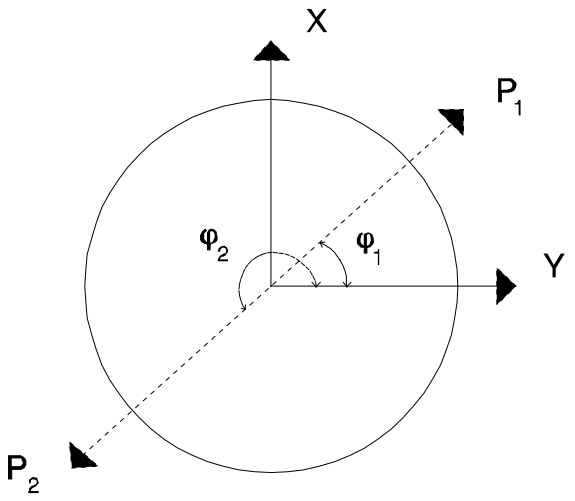

Abb. 3.1 Koplanarität der elastischen Proton-Proton Streuung

ii. Kinematische Korrelation

Die elastische Proton-Proton Streuung ist charakterisiert durch eine spezielle Kinematik. Die identischen Massen von Projektil und Target vereinfachen die Kinematik soweit, daß man für die Polarwinkel θ_l und θ_r der beiden Protonen im Ausgangskanal folgende Korrelation erhält:

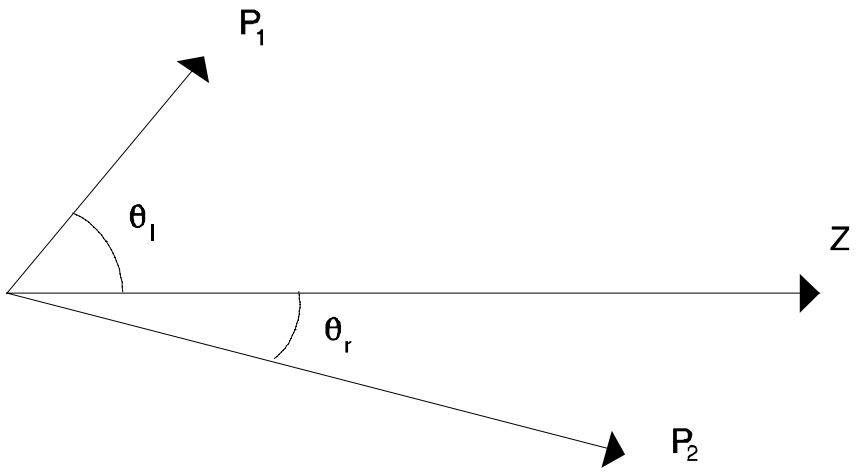

Abb. 3.2 Kinematische Korrelation in der elastischen Proton-Proton Streuung.

$$\tan\theta_l \cdot \tan\theta_r = \frac{2\ m_p}{T_{kin} + 2\ m_p} = \frac{1}{\gamma^2} \qquad (3.1.2)$$

T_{kin} ist die kinetische Energie der Protonen im Einschuß und m_p die Ruhemasse des Protons. Der Faktor γ ist durch die Geschwindigkeit βc des c.m. Systems gegenüber dem Laborsystem bestimmt:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \qquad (3.1.3)$$

Der Detektor muß also auch in der Lage sein, die Polarwinkel θ_l und θ_r mit guter Auflösung zu bestimmen. Die ideale Geometrie wäre eine Detektoranordnung als Halbkugel mit dem Target im Zentrum. Bei identischen Detektorsegmenten hätte man damit eine konstante Winkelauflösung über den gesamten Raumwinkel. In der Praxis ist eine solche Anordnung nur mit großem Aufwand zu realisieren. Ein geeignetes, auch technisch machbares, Konzept ist eine zylinderförmige Anordnung mit dem **COSY**-Strahl als z-Achse. Die Bestimmung der Azimut- und Polarwinkel erfolgt getrennt in zwei voneinander völlig entkoppelten Lagen aus Szintillationszählern.

3.2 Die Streifenlage

Die erste Lage zur Messung der Azimutwinkel besteht aus 32 Szintillatorstreifen von 950 mm Länge, die im radialen Abstand 160 mm parallel zur Strahlachse angeordnet sind. Die Verwendung von gerade 32 Segmenten liegt an der 16 Bit Busbreite der koplanaren Triggerlogik, bei der eine Vorhersage von 16 Segmenten einer Hemisphäre auf die 16 Segmente der anderen Hemisphäre erfolgt [Schwa 91].

Die Länge und der radiale Abstand sind durch die räumliche Ausdehnung der Target-konstruktion und die fertigungstechnischen Möglichkeiten festgelegt. Wegen der

Targethalterung ist der maximal mögliche Streuwinkel auf θ_{lab} = 72.1° beschränkt. Bei einer vorgegebenen Länge der Szintillatorstreifen von L_s = 950 mm und einem radialen Abstand R_S = 160 mm ergibt sich folgende Beziehung:

$$\frac{L_s}{R_s} = \frac{1}{\tan\theta_{min}} - \frac{1}{\tan\theta_{max}} \qquad (3.2.1)$$

Die Streifenlage deckt damit den Winkelbereich von 9° bis 72.1° ab. Je nach **COSY**-Energie wird damit ein Anteil von 85% bis 89% des des gesamten Raumwinkels abgedeckt.

Die Azimutwinkelauflösung beträgt bei 32 Streifen

$$\Delta\varphi = \frac{360}{32} = 11.25^{o} \qquad (3.2.2)$$

Dieser Wert entspricht noch nicht den Anforderungen an eine hohe Winkelauflösung. Durch das Prinzip der Amplitudenteilung, verbunden mit einer speziellen Querschnittsform der Szintillatorstreifen, kann die Winkelauflösung um einen Faktor 5-10 verbessert werden.

3.3 Das Prinzip der Amplitudenteilung

Die Amplitudenteilung basiert auf der Proportionalität von Energieverlust und durchdrungener Materialdicke ionisierender Teilchen. Legt man zwei Szintillatoren so nebeneinander, daß ein vom Target kommendes Teilchen beide durchdringt und in jedem unterschiedliche Wegstrecken zurücklegt, so kann aus der erzeugten Lichtmenge die Flugstrecke innerhalb der beiden Szintillatoren berechnet werden. Die folgende Abbildung verdeutlicht das Prinzip.

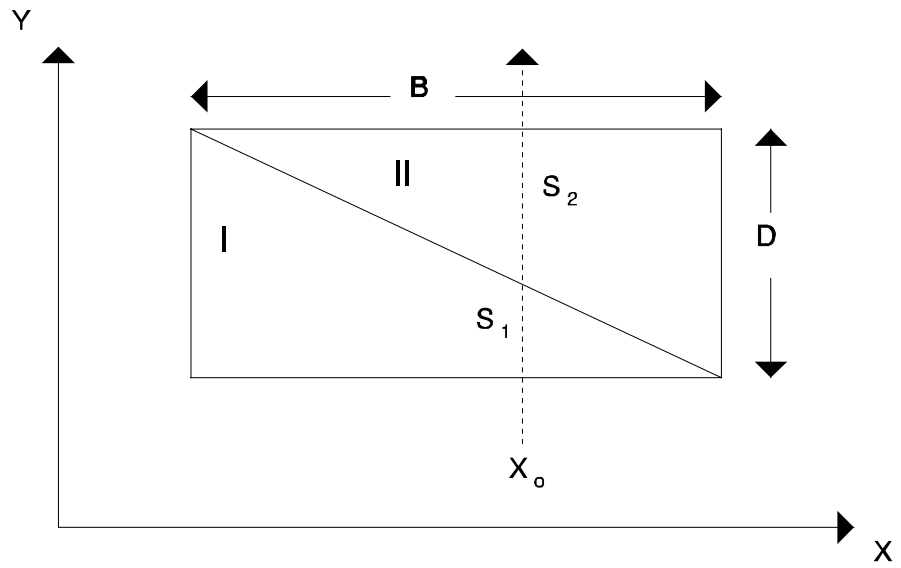

Abb. 3.3 Prinzip der Amplitudenteilung

I und II sind zwei Szintillatoren mit dreieckigem Querschnitt, S_1 und S_2 die zurückgelegten Wegstrecken eines senkrecht durchfliegenden Teilchens. D ist die maximale Dicke und B die Breite der Szintillatoren. Ziel der folgenden Überlegungen ist die Bestimmung des Punktes X_o aus den Strecken S_1 und S_2.

$$X_o = \frac{S_2}{S_1 + S_2} B \qquad (3.3.1)$$

Die Strecken S_1 und S_2 sind direkt proportional dem Energieverlust und damit dem Maximum des Pulshöhenspektrums. Zur Erzeugung der Pulshöhenspektren wird das Licht an beiden Enden der Szintillatorstreifen über Lichtleiter auf Photomultiplier vom Typ R3082 von HAMAMATSU [HAM 88] geleitet. In Targetnähe muß das Licht wegen der Ausdehnung der Targetkammer spitzwinklig ausgekoppelt werden, während am targetfernen Ende eine rechtwinklige Auskopplung erfolgt. Die analogen Pulse jedes Szintillatorstreifens werden in einen **F**ast **E**ncoding and **R**eadout **A**nalog to Digital Converter (FERA) [FER 92] gegeben. Die Auslesung der Szintillatorstreifen an beiden Enden gewährleistet, daß der dynamische Bereich der ADC's ausreicht. Zu jedem vom

Triggersystem erkannten Ereignis werden die relevanten ADC's ausgelesen, und aus den Pulshöhenspektren kann bei bekannter Breite B der Elementarzellen, nach Gleichung (3.3.1), der genaue Durchstoßpunkt ermittelt werden. Die konkrete Anordnung und Querschnittsform der einzelnen Szintillatorstreifen zeigt die folgende Abbildung.

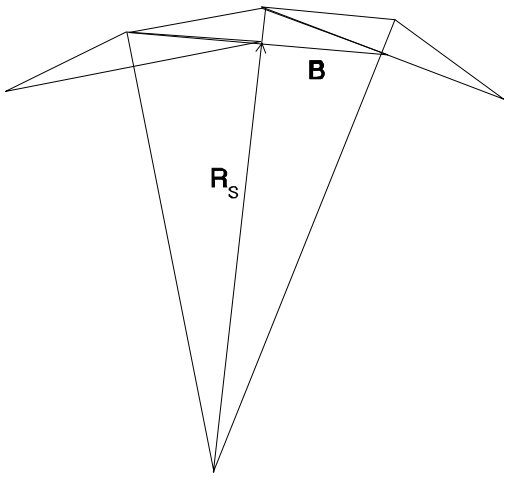

Abb. 3.4 Querschnitt und Anordnung der Szintillatorstreifen zur Realisierung der Amplitudenteilung

Eine Elementarzelle ist durch den Überlapp zweier benachbarter Szintillatorstreifen definiert. Der Wert B für die Breite einer Elementarzelle beträgt mit R_S = 160 mm:

$$B = \frac{2\pi R_S}{2 \cdot 32} = 15.7 \text{ mm} \qquad (3.3.2)$$

Eine Teststrahlzeit mit minimal ionisierenden Elektronen, am **D**eutschen **E**lektronen **SY**nchrotron (DESY) in Hamburg, hat gezeigt, daß mit der Amplitudenteilung eine Winkelauflösung von

$$\Delta\varphi = 1^{o}$$

erreicht werden kann [Küh 91]. Das entspricht einer Ortsauflösung von etwa 1.5 mm.

3.4 Die Ringlage

Zur Bestimmung der Polarwinkel θ_l und θ_r wird eine Anordnung von zwei mal 29 Halbringen verwendet. Durch die Konstruktion von zwei Halbschalen ist zum einen die Lichtauslese günstiger, und zum anderen trifft jedes der beiden Protonen im symmetrischen Winkel einen eigenen Halbring. Bei vollen Ringen würden beide Protonen den gleichen Ring treffen und das Ereignis wäre nicht von Konkurrenzreaktionen über die kinematische Korrelation (3.1.2) zu unterscheiden. Im Gegensatz zu den Streifen sind die Halbringe in ihren Abmessungen alle verschieden, da sie der Kinematik angepaßt werden müssen. Die Ausdehnung der Halbringe in z-Richtung wird zu kleineren Streuwinkeln immer größer, damit die von einem Ring abgedeckten Winkelbereiche in etwa gleich bleiben. Man muß also eine Segmentierung erzeugen, die folgende Randbedingungen erfüllt:

1. Der Winkelbereich von $\theta_{lab} = 9^o$ bis 72.1^o muß abgedeckt werden.

2. Die Zahl der Halbringe muß, mit der Nebenbedingung, daß immer eine Vorhersage von maximal 16 Rückwärtsringen auf maximal 16 Vorwärtsringe möglich ist, auf zwei mal 29 beschränkt sein. Das liegt an der Busbreite der Triggerlogik von 16 Bit unter Berücksichtigung des kinematischen Ganges des symmetrischen Winkels mit der Energie der Projektile.

3. Die Halbringe werden direkt auf die Streifenlage montiert. Die Szintillatorstreifen haben eine Dicke von 6.8 mm, und mit Berücksichtigung des Platzbedarfs eines tragenden Gestells für die Halbringe, beträgt der radiale Abstand R_r der Ringlage 170 mm.

4. Auch bei den Halbringen soll die Winkelauflösung durch die Amplitudenteilung verbessert werden. Aufgrund der Geometrie benötigt man dazu keine komplizierten geometrischen Querschnitte für die Halbringe. Die folgende Abbildung verdeutlicht die Situation

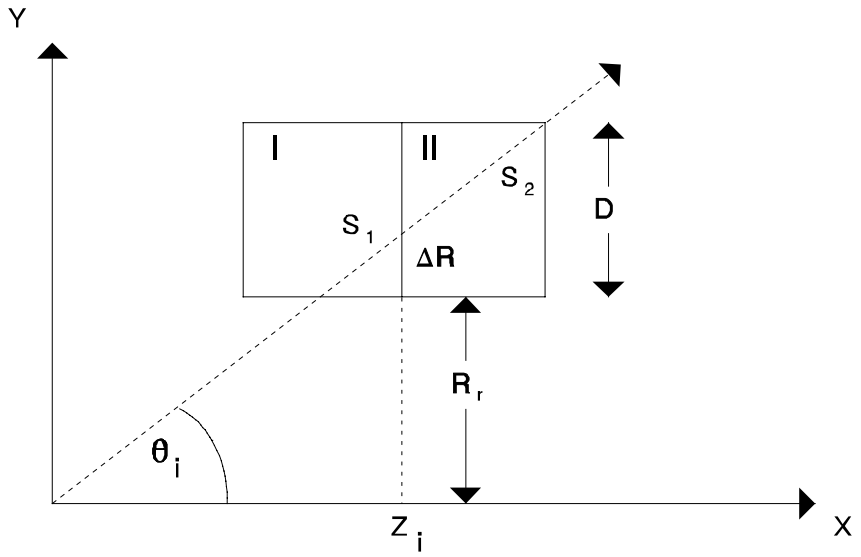

Abb. 3.5 Prinzip der Amplitudenteilung bei den Halbringen

I und II sind zwei benachbarte Halbringe der Dicke D. Ein vom Target kommendes Teilchen legt im Halbring I die Strecke S_1 und im Halbring II die Strecke S_2 zurück. Das Ziel ist die Bestimmung der Strecke ΔR, die addiert zum radialen Abstand R_r über die Beziehung

$$\tan \theta_i = \frac{R_r + \Delta R}{Z_i} \qquad (3.4.1)$$

eine genaue Polarwinkelbestimmung erlaubt. Die Strecke ΔR erhält man aus:

$$\Delta R = \frac{S_1}{S_1 + S_2} D \qquad (3.4.2)$$

Die Strecken S1 und S2 sind wieder dem Energieverlust proportional und können aus den Pulshöhenspektren extrahiert werden. Die Halbringe werden einseitig über rechtwinklig angebrachte Lichtleiter ausgelesen, die das Licht auf HAMAMATSU Photomultiplier vom Typ R1450 [HAM 88] transportieren. Die Signalverarbeitung erfolgt mit dem FERA System. Eine Teststrahlzeit bei DESY mit minimal ionisierenden Elektronen hat gezeigt,

daß die Amplitudenteilung auch für die Halbringe funktioniert [Wol 92]. Die Verbesserung der Winkelauflösung beträgt wie bei den Szintillatorstreifen einen Faktor 5-10.

Damit die Amplitudenteilung bei den Halbringen angewendet werden kann, muß die Segmentierung so beschaffen sein, daß alle vom Target kommenden Teilchen immer durch zwei benachbarte Halbringe laufen. Um ein sicheres Ansprechen beider Halbringe zu gewährleisten, müssen die Teilchen in jedem Halbring eine Mindestwegstrecke zurücklegen. Folgende Abbildung dient als Ausgangspunkt für die Überlegungen zur Erzeugung einer realistischen Segmentierung:

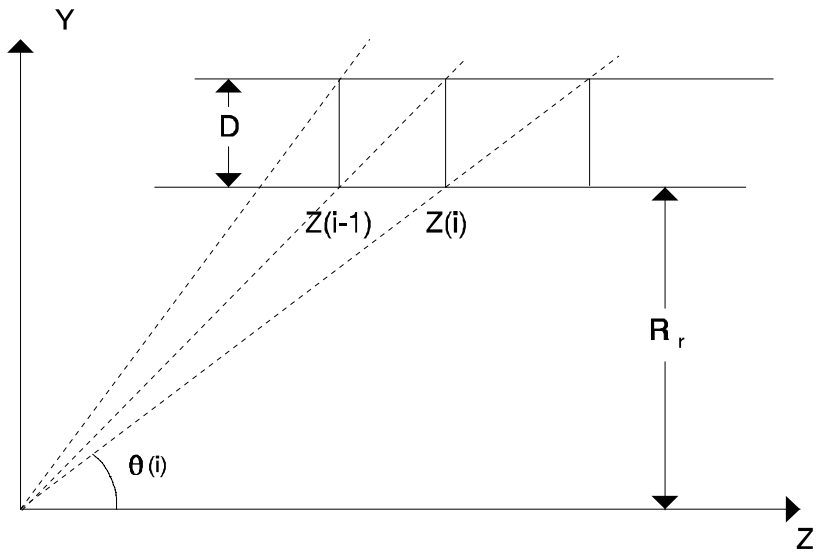

Abb. 3.6 Idealisierte Segmentierung zur Realisierung der Amplitudenteilung

Die Segmentgrenzen Z(i) erhält man mit folgendem einfachen Algorithmus:

$$\frac{Z(i) - Z(i-1)}{Z(i-1)} = \frac{D}{R_r} \tag{3.4.3}$$

$$\Rightarrow \qquad Z(i) = Z(i-1)\cdot(1 + D/R_r) \tag{3.4.4}$$

R_r ist der radiale Abstand zur Strahlachse und D ist die Ringdicke, die als freier Parameter zur Verfügung steht. Dieser einfache Algorithmus erfüllt nicht die Forderung nach einer minimalen Wegstrecke. An den Stellen Z(i) wird offensichtlich nur ein Halbring getroffen. Die Mindestwegstrecke sollte wegen des begrenzten dynamischen Bereichs der ADC's keine Konstante sein, sondern dynamisch an die maximal mögliche Wegstrecke des jeweiligen Rings angepaßt sein. Die folgende Abbildung zeigt die geometrischen Verhältnisse, die in einem realistischen Algorithmus berücksichtigt werden müssen.

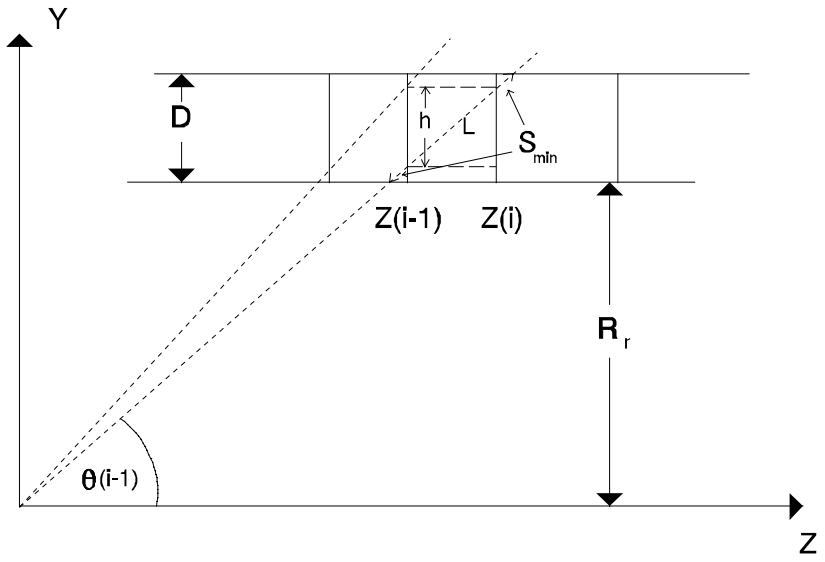

Abb. 3.7 Realistische Segmentierung der Ringlage

Die Weglänge der Teilchen in der Ringschale sei L. Der Anteil P davon soll im vorigen und nächsten Ring als Überlapp S_{min} zurückgelegt werden. Der Gesamtüberlapp in beiden benachbarten Ringen ist dann gegeben durch $S = 2 \cdot S_{min}$. Für den Anteil P findet man:

$$P := \frac{S}{L} = \frac{D - h}{D} \tag{3.4.5}$$

$$\Rightarrow \qquad h = (1 - P) \cdot D \tag{3.4.6}$$

Analog zu (3.4.3) erhält man folgenden modifizierten Algorithmus:

$$\frac{Z(i) - Z(i-1)}{Z(i-1)} = \frac{h}{R_r} \tag{3.4.7}$$

$$\Rightarrow \qquad Z(i) = Z(i-1)\cdot\left(1 + \frac{(1-P)\,D}{R_r}\right) \tag{3.4.8}$$

Man kann nun noch die Dicke V des Verpackungsmaterials berücksichtigen, so daß man folgenden Algorithmus erhält:

$$Z(i) = Z(i-1)\cdot\left(1 + \frac{(1-P)\,D}{R_r}\right) - V \tag{3.4.9}$$

Der Gesamtüberlapp S in den benachbarten Ringen beträgt

$$S = \frac{D}{R_r}\sqrt{Z(i-1)^2 + R^2} \tag{3.4.10}$$

Die beiden freien Parameter D und P müssen so optimiert werden, daß alle Randbedingungen erfüllt sind. Mit Werten von

D = 23 mm
V = 0.2 mm
P = 0.194

erhält man folgende Tabelle, in der von links nach rechts die Ringnummer Nr, die z-Position des Ringbeginns Z, die Ringbreite ΔZ, der Laborwinkel θ_{lab}, der für die mittlere **COSY**-Energie von 1.5 GeV zugehörige c.m. Winkel θ_{cm} und der vom Ring abgedeckte

c.m. Winkelbereich $\Delta\theta_{cm}$ angegeben sind. In der letzten Spalte ist der Überlapp $S_{min} = S/2$, mit S nach (3.4.10) angegeben.

Nr	Z [mm]	ΔZ [mm]	Θ_{lab} [Deg]	Θ_{cm} [Deg]	$\Delta\Theta_{cm}$ [Deg]	S_{min} [mm]
1	55.0	5.8	72.1	152.9	2.8	2.2
2	60.8	6.4	70.3	150.1	3.0	2.4
3	67.2	7.2	68.4	147.1	3.2	2.4
4	74.4	7.9	66.4	143.9	3.5	2.4
5	82.3	8.7	64.2	140.4	4.0	2.4
6	91.0	9.7	61.8	136.4	4.0	2.5
7	100.7	10.8	59.4	132.4	4.6	2.5
8	111.5	12.0	56.7	127.8	4.7	2.6
9	123.5	13.2	54.0	123.1	5.0	2.7
10	136.7	14.7	51.2	118.1	5.3	2.8
11	151.4	16.3	48.3	112.8	5.4	2.9
12	167.7	18.1	45.4	107.4	5.7	3.0
13	185.8	20.1	42.5	101.7	5.7	3.1
14	205.9	22.2	39.6	96.0	6.1	3.3
15	228.1	24.7	36.7	89.9	5.8	3.5
16	252.8	27.3	33.9	84.1	5.7	3.7
17	280.1	30.4	31.3	78.4	5.8	4.0
18	310.5	33.6	28.7	72.6	5.5	4.3
19	344.1	37.3	26.3	67.1	5.4	4.7
20	381.4	41.4	24.0	61.7	5.0	5.0
21	422.8	45.9	21.9	56.7	4.9	5.5
22	468.7	50.9	19.9	51.8	4.5	6.0
23	519.6	56.4	18.1	47.3	4.2	6.6
24	576.0	62.6	16.4	43.1	3.8	7.2
25	638.6	69.4	14.9	39.3	3.6	7.9
26	708.0	77.0	13.5	35.7	3.4	8.7
27	785.0	85.3	12.2	32.3	2.8	9.6
28	870.3	94.7	11.1	29.5	2.9	10.6
29	965.0	35.0	10.0	26.6	1.0	11.7

Tab. 3.1 Parameter der Segmentierung der Ringlage

Die Zahl der Halbringe einer Hemisphäre beträgt 29, wobei die Ringe 13,14,15 und 16, je nach Einschußenergie, sowohl Vorwärtsringe als auch Rückwärtsringe sein können. Der letzte Ring Nr. 29 kann auf eine Breite von 35 mm beschränkt werden und ist damit an die Länge der Szintillatorstreifen angepaßt. Da die Szintillatorstreifen in Targetnähe, also bei kleinen z-Werten, spitzwinklig ausgelesen werden, müssen die ersten 8 Ringe durch

eine Anordnung aus szintillierenden Fasern ersetzt werden. Eine Amplitudenteilung ist dann nicht mehr möglich, aber wegen der geringen Ausdehnung der einzelnen Fasern von 2.5 mm auch nicht nötig. Um für die Triggerlogik wieder 8 Segmente zu erhalten, werden benachbarte Fasern so zusammengefaßt, daß die resultierende Δz-Ausdehnung etwa der der Ringe 1 bis 8 entspricht. Schematisch erhält man dann folgende Anordnung für die Segmente der äußeren Lage in Targetnähe:

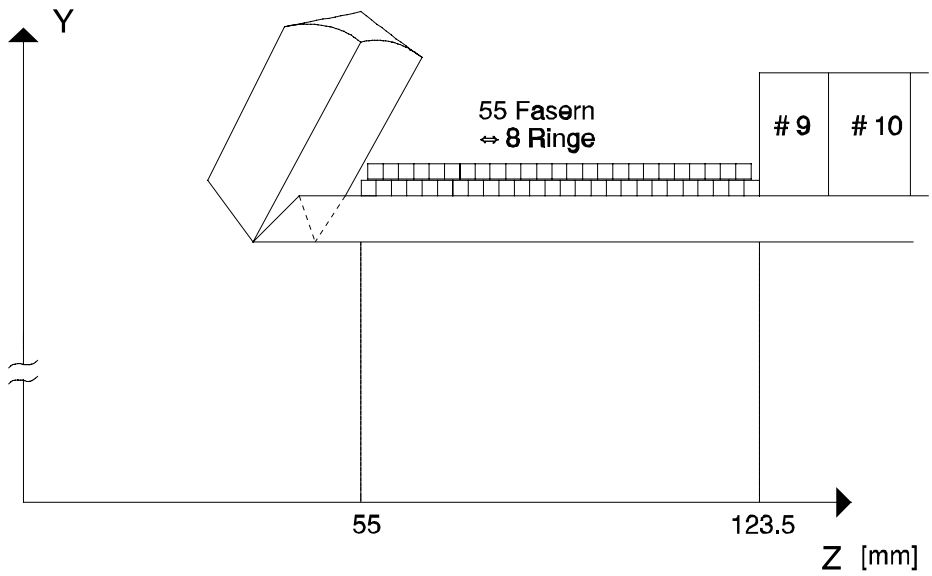

Abb. 3.8 Segmentierung der äußeren Lage mit Szintillatorstreifen, Halbringen und szintillierenden Fasern.

Die durch die Randbedingung an eine mögliche Amplitudenteilung erzeugte Segmentierung erfüllt auch die Anpassung der Ringabmessungen an die Proton-Proton Kinematik. Das erkennt man sehr gut an den in Tabelle 3.1 angegebenen $\Delta\theta_{cm}$ Intervallen, die von einem Ring abgedeckt werden. Mit der hier beschriebenen äußeren Lage des Detektors kann das Experiment in der Phase 1 bereits durchgeführt werden. Insbesondere ist durch die Beschränkung auf maximal 16 Vorwärts- und Rückwärtsringe die Möglichkeit gegeben, aus den Triggerdaten Online-Anregungsfunktionen mit einer Winkelauflösung zu erzeugen, die der Granularität der Ringe entspricht [Schwa 91].