5.3 Messung der Winkelverteilung von dσ/dΩ(pp->pp) bei T= 747 MeV

Die Winkelverteilung des differentiellen Wirkungsquerschnittes dσ/dΩ der elastischen pp-Streuung wurde für 10 Streuwinkel θ_{LAB} bei einer festen Strahlenergie von 747 MeV gemessen. In jeder Winkeleinstellung der Teleskop-Hodoskop Anordnung wurde dσ/dΩ sowohl mit einem CH_2-Fädchentarget (Flächentargetdichte: $N \approx 6.19 \cdot 10^{20}$ g/cm^2) als auch mit einem Fädchentarget aus Kohlenstoff (Flächentargetdichte: $N \approx 5.20 \cdot 10^{20}$ g/cm^{-2}) [8] bestimmt, so daß bei der Analyse die Möglichkeit bestand, die Untergrundereignisse aus der Streuung von Protonen an Kohlenstoffkernen zu ermitteln.

Durchführung

Der Abstand des Teleskops zum Target wurde für alle Winkel so eingestellt, daß das Teleskop den Raumwinkel der Koinzidenzmessung mit dem Hodoskop bestimmte. Der Teleskopwinkel θ_T wurde von $\theta_T = 20°$ in 10 Winkelschritten bis $\theta_T = 70°$ variiert. Für jeden Teleskopwinkel θ_T wurde gemäß Gleichung 5.5 der mittlere Hodoskopstreifen auf den korrelierten Winkel θ_H eingestellt (s. Tabelle 5.4). Der Trigger dieser Anordnung bestand aus der Koinzidenz der 4 Teleskopkanäle (s. Abb. 5.3). Die Meßzeit wurde jeweils so angepaßt, daß für jede Winkeleinstellung ca. 50000 Triggerereignisse akkumuliert wurden.

Das Target wurde 100 ms nach Erreichen des 'flat-tops' bei 747 MeV in den Strahl hinein- und nach 2 s wieder aus dem Strahl herausgefahren. Ein kompletter Zyklus von Injektion zu Injektion dauerte ca. 8 s.

Ein fest installierter Szintillator unter $\theta_{LAB} = 90°$, der sog. **TPM**, diente als zusätzliches Luminositätssignal[9]. Sowohl der Scalerkanal des TPM als auch der des SEM wurden mit einer Frequenz von 400 Hz ausgelesen (s. Abb. 5.3), so daß die Informationen beider Luminositätsmonitore gleichzeitig vorlagen.

Auswertung

Die einzelnen Auswertungsschritte erfolgten in derselben Weise wie bei der Auswertung der Anregungsfunktionsmessung (s. Abschnitt 5.2). Die Energieverlustkorrektur des SEM-Signals mußte hier allerdings nicht berücksichtigt werden, da sich die Energie des Strahls in der Meßzeit nicht änderte. Die Totzeit der Datenaufnahme betrug relativ zur Datenaufnahmezeit für alle Messungen weniger als 30%. Die Genauigkeit der TPM-Normierung hängt von der Zahl der Ereignisse ab, die in jedem Zeitintervall aufgenommmen werden.

---

[8] CH_2-Fädchen: 14 µm Durchmesser; Dichte 0.936 g/cm^3 mit einer Aluminiumbedampfung von 21 µg/cm^2. C-Fädchen: 5 µm Durchmesser; Dichte 2.2-2.3 g/cm^3 [MOS94]

[9] Man setzt hierbei voraus, daß alle Ereignisse, die der TPM zählt, aus der Wechselwirkung des Strahls mit dem Fädchen entstanden sind (s.u.).

θ_T [Grad]	L_T [mm]	$\Delta\Omega$ [msr]	θ_H [Grad]	L_H [mm]
20	475	1.2	63.0	455
25	400	1.6	56.9	435
30	690 (398)	0.6 (1.6)	51.1	490 (453)
40	482	1.2	40.2	490
45	472	1.2	35.6	438
50	375	1.9	31.0	500
55	344	2.3	26.6	490
60	315	2.3	22.4	582
65	315 (445)	2.3 (1.4)	18.4	525 (485)
70	235 (298)	3.5 (2.5)	14.6	710 (670)

Tabelle 5.4 Geoemtrieparameter der Teleskop/Hodoskop-Anordnung bei einer Strahlenergie von 747 MeV (zu den Bezeichnungen s. Abb. 5.1). Die angegebenen Winkel beziehen sich auf das Laborsystem. Für 3 Winkel unterscheiden sich die Einstellungen für die Messungen mit dem C-Target (Werte in Klammern) von denen der Messung mit dem CH_2-Target.

Bei einer Ringfüllung von $0.5 \cdot 10^8$ Protonen betrug die TPM-Rate beim Erreichen der Targetsollposition für das CH_2-Fädchen $7 \cdot 10^4$ s^{-1} bzw. für das C-Fädchen $1.8 \cdot 10^4$ s^{-1}, was einem statistischen Fehler pro Zeitintervall (2.5 ms) von 8% bzw. 15% entspricht. Aufgrund der endlichen Strahllebensdauer (s. Abb. 5.9) nimmt die Zählrate während eines Meßzyklus ab, so daß die statistische Unsicherheit der TPM-Normierung entsprechend zunimmt. Das in der Auswertung betrachtete gesamte Zeitintervall betrug für die Messung mit dem CH_2-Fädchen 330 ms, für die Messung mit dem C-Fädchen 830 ms. Der Beginn der Zeitintervalle lag bei t = 170 ms, d.h. 50 ms nach Erreichen der Targetsollposition im Strahl (Einfahrzeit des Targets ≈ 120 ms).

Zur sprachlichen Vereinfachung wird wie in Abschnitt 5.2 der Begriff '**Protonenpeak**' verwendet. Er beschreibt den Peak in einem Diagramm, in dem die im Hodoskop akkummulierten Ereignisse gegenüber dem Streuwinkel bzw. den Hodoskopstreifennummern aufgetragen sind. Die Ereignisse im Protonenpeak werden nach einer entsprechenden Untergrundsubtraktion mit den Ereignissen der elastischen pp-Streuung identifiziert. Der

Schwerpunkt des Protonenpeaks liegt für alle eingestellten Streuwinkel im Bereich der drei mittleren Hodoskopsstreifen.

Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 5.9 erkennt man, daß sich die Lebensdauer τ des Strahls für das 5 µm dicke C-Target und für das 14 µm dicke CH_2-Target unterscheidet. Im Fall des C-Targets beträgt $\tau \approx 1000$ ms, im Fall des CH_2-Target $\tau \approx 200$ ms. Die schnelle Abnahme des SEM-Signals nach dem Erreichen der Targetsollposition läßt sich durch die in x- und y-Richtung schnell anwachsende Strahlausdehnung erklären. Simulationen ([HIN93b]; s. Abb. 5.9a) zeigen, daß sich der Strahl innerhalb der ersten 50 ms aufgrund der Kleinwinkelstreuung im Target sehr schnell aufweitet. Demzufolge nimmt die Strahldichte im Wechselwirkungsbereich mit dem Fädchen und damit die Luminosität rapide ab. Die Ausdehnung des sich aufweitenden Strahls wird durch die transversale Akzeptanz des Beschleunigers[10] begrenzt, wodurch Strahlverluste

Abb 5.9 Zeitliche Abhängigkeit des SEM und TPM Signals für die Winkeleinstellung $\theta_{LAB} = 20°$ bei einer Ringfüllung von $0.5 \cdot 10^8$ Protonen. Bei t = 120 ms erreicht das Target die Sollposition im COSY-Strahl. Aus dem zeitlichen Verlauf der Signale wird die Strahllebensdauer τ ermittelt werden. Mittels eines VFC (Voltage to Frequency Converters) wird der Strom des SEM in eine Spannung und anschließend in eine Frequenz umgewandelt, so daß die Frequenz proportional zum Sekundärelektronenstrom ist.

(a) 14 µm CH_2-Target: SEM, TPM, Simulation des SEM-Signals [HIN93]; $\tau \approx 200$ ms

(b) 5 µm C-Target: SEM, TPM; $\tau \approx 1000$ ms

[10] Als maximale transversale Emittanzen wurden $\epsilon_x = 30$ mm·mrad bzw. $\epsilon_y = 25$ mm·mrad und als longitudinale Emittanz $\epsilon_z = 1$ m·rad angenommen, die aus den entsprechenden Werten der Betatronfunktion des COSY-Beschleunigers abgeschätzt wurden [HIN93].

Abb. 5.10 (a) 14 µm CH_2-Target: obere Kurve: Zählratenverhältnis von TPM zu SEM; untere Kurve: Zählratenverhältnis von elastisch gestreuten Protonen zu SEM; als elastisch gestreute Protonen werden die Ereignisse gewertet, die die Koinzidenzbedingung zwischen dem Teleskop und einem der 3 mittleren Hodoskopstreifen erfüllen.

(b) 5 µm C-Target : oberer Kurve: Zählratenverhältnis von TPM zu SEM; untere Kurve: Zählratenverhältnis von Hodoskopuntergrund und SEM; als Hodoskopuntergrund werden alle Ereignisse bezeichnet, die die Koinizidenzbedingung zwischen dem Teleskop und einem der 7 Hodoskopstreifen erfüllen.

entstehen, die sich in einem nahezu exponentiell abfallenden Luminositätssignal bemerkbar machen.

Betrachtet man das zeitliche Verhalten der Koinzidenzraten[11] N_{Koinz} und die zum Sekundärelektronenstrom proportionale Zählrate N_{SEM}, so erwartet man ein konstantes Verhältnis beider Größen. In einem Zeitintervall von 200-700 ms ist dieses Verhalten sowohl für das CH_2-Target als auch für das C-Target erfüllt (s. Abb. 5.10). Die Zählrate des TPM hingegen zeigt im Vergleich zum SEM ein anderes Verhalten, weshalb das Verhältnis N_{TPM}/N_{SEM} in Abb. 5.10 zeitlich nicht konstant ist. Da der TPM auch Ereignisse zählt, deren Vertizes nicht im Bereich des Fädchens liegen, tragen vermutlich Reaktionen zu der TPM-Zählrate bei, die durch die Wechselwirkung eines Halo-Strahls mit der Targetgabel entstehen.

Die vier im EDDA-Experiment vorgesehenen PIN-Dioden, die einerseits durch den Nachweis von Deltaelektronen eine unabhängige Luminositätsmessung ermöglichen und andererseits aufgrund der geometrischen Anordnung sensitiv auf Strahlschwankungen im Targetbereich sind, erweisen sich angesichts dieser Erfahrungen zur zusätzlichen

[11] Unter dem Begriff 'Koinzidenzrate' werden hier die koinzidenten Ereignisraten zwischen dem Teleskop und dem Hodoskop verstanden. Für das CH_2-Target erhält man somit die im Target elastisch gestreuten Protonen, für ein C-Target den Untergrund aus inelastischen Reaktionen (s. Abb. 5.10).

Luminositätbestimmung als unerläßlich.

In Abbildung 5.9 erkennt man, daß die Amplitude des SEM-Signals bei gleichem Strahlstrom für das C-Target größer ist als für das mit Aluminium bedampfte CH_2-Target, obwohl die Flächentargetdichte des C-Targets kleiner ist[12]. Wahrscheinlich führt die unterschiedliche Struktur der Oberflächen der Targets zu einer unterschiedlichen Leitfähigkeit [MOS94]. Der Skalierungsfaktor s, der das Verhältnis der SEM-Signale der beiden Targets bei gleichem Srtahlstrom beschreibt, kann aus den Messungen bestimmt werden:

$$\text{scal} = \frac{\text{Amplitude SEM}_C}{\text{Amplitude SEM}_{CH_2}} \approx 4.4 \qquad (5.7)$$

In Abbildung 5.11 ist die Verteilung der auf das Signal des SEM normierten Ereignisse im Hodoskop für 3 Streuwinkel dargestellt. Die drei Diagramme der linken Spalte sind die Ergebnisse dieser Messung. Die schraffierte Bereich stellt die Messung mit dem C-Target dar. Die Normierung der Meßdaten der C-Messung wurde entsprechend Gleichung (5.7) an die Daten der CH_2-Messung angepaßt. Die Breite des Protonenpeaks ist für $\theta_{LAB} = 40°$ am kleinsten, da in diesem Winkelbereich die Kleinwinkelstreuung θ_{rms} (s. Gl. 5.3) der Teilchen im Strahlrohr am geringsten ist. Bei größeren Winkeln ist die Energie der Protonen geringer ($\theta_{rms} \sim 1/p\beta$) und für kleine Winkel nimmt die effektiv durchdrungene Strahlrohrdicke zu, so daß θ_{rms} in diesen Winkelbereichen ansteigt. In den drei rechten Diagrammen von Abbildung 5.11 sind die Ergebnisse einer Simulation [GRO94] dargestellt. Es wurde für die Geometrie der Teleskop-Hodoskop Anordnung je eine Rechnung sowohl für die rein elastische pp-Streuung (durchgezogene Linie) als auch für das C-Target durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation reproduzieren die Messungen gut. Im Hinblick auf die Auswertung des EDDA-Experiments ist dies sehr wichtig, da mit Simulationsrechnungen eine realitätsnahe Untersuchung von Untergrundreaktionen möglich ist.

Desweiteren sieht man in Abbildung 5.11, daß der Untergrund, der in diesem Energiebereich hauptsächlich durch die quasi-elastische Streuung von Strahlteilchen an den C-Kernen entsteht, deutlich von den Ereignissen der rein elastischen pp-Streuung getrennt werden kann. Der Anteil dieses Untergrundes zur rein elastischen pp-Streuung ist winkelabhängig und beträgt im ungünstigsten Fall ($\theta_{LAB} \approx 45°$) 17% (s. Abb. 5.12). Die relativen Fehler in Abbildung 5.12 betragen maximal 12 % und resultieren hauptsächlich aus dem statistischen Fehler der Ereignisse aus der Messung mit dem C-Target.

[12] Die Luminosität L ist bei einem Fädchen mit dem Radius r und der Dichte ρ proportional zu $\rho \cdot r^2$.

Abb. 5.11 (a) Linke Spalte: Verteilung der gemessenen, auf das Signal des SEM normierten Ereignisse für 3 Streuwinkel im Laborsystem. Durchgezogene Linie: Messung mit einem CH_2-Target. Schraffierter Bereich: Messung mit einem C-Target

(b) Rechte Spalte: Simulation der Messung aus (a) [GRO94]; der schraffierte Bereich stammt aus der Reaktion pC->X.

Abb. 5.12 Verhältnis der Untergrundereignisse der Reaktion (pC-> X) zu den Ereignissen der rein elastischen pp-Streuung in Abhängigkeit des Streuwinkels θ_{LAB} für T = 747 MeV.

Subtrahiert man im Hodoskop die Untergrundereignisse für jede Winkeleinstellung von den Ereignissen der Messung mit dem CH_2-Target, so erhält man die relativ gemessene Winkelverteilung von $d\sigma/d\Omega$ der elastischen Proton-Proton (pp) Streuung[13]. Die Anpassung der Meßwerte durch einen Skalierungsfaktor an den Weltdatensatz[14] ergibt den absoluten Verlauf von $d\sigma/d\Omega$(pp->pp). In Abbildung 5.13 ist die Winkelverteilung, die auf dem Weltdatensatz basiert, als durchgezogene Linie dargestellt. Die Meßpunkte sowohl für die SEM-Normierung als auch für die TPM-Normierung stimmen im Rahmen der Fehler mit dem Weltdatensatz überein.

Diese Vorstudien zum EDDA-Experiment zeigen, daß die relative Normierung der Detektordaten auf die Luminosität sowie die Untergrundsubtraktion möglich sind. Die für das C-Target aufgetretenen, aber bisher noch unerklärten Effekte im zeitlichen Verlauf der Zählraten des TPM sind Gegenstand weiterer Untersuchungen. Das Triggerkonzept des EDDA-Detektors, das auf 2 kinematischen Korrelationen der elastischen pp-Streuung beruht (Gl. 5.4, 5.5), kann diesen Messungen zufolge sehr effizient Ereignisse der quasi-elastischen Streuung von Strahlteilchen an C-Kernen unterdrücken. Weiterhin kann festgestellt werden, daß die Einzelzählrate der Detektoren mit zunehmenden Streuwinkel θ_{LAB} abnimmt, was ein Hinweis darauf ist, daß die Untergrundzählrate am COSY Targetplatz TP2 durch die Wechselwirkung des Strahls mit dem Target entsteht (s. Abb. 5.14).

[13] Der Untergrund der auf das Signal des TPM normierten Ereignisse wurde aus den Randstreifen des Hodoskops abgeschätzt und linear über alle Hododskopstreifen extrapoliert.

[14] extrahiert aus dem Programmpaket SAID [SAID93].

Abb. 5.13 Winkelverteilung von $d\sigma/d\Omega$ der elastischen Proton-Proton Streuung für eine Strahlenergie von 747 MeV. Die durchgezogene Linie basiert auf dem Weltdatensatz.

Abb. 5.14 Mit einem Szintillator gemessene Einzelzählraten in Abhängigkeit des Streuwinkels θ_{LAB} für eine Strahlenergie von 747 MeV und ein 14 μm CH_2-Target (Luminosität $L \approx 1 \cdot 10^{31}$ $cm^{-1}s^{-1}$). Die Zahl der Protonen pro Ringfüllung betrug $5 \cdot 10^7$. Die durchgezogene Linie ist das Ergebnis einer Simulation für eine Luminostität von $L = 1 \cdot 10^{31}$ $cm^{-2}s^{-1}$ [THE92].