

1 Einleitung

Zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen elementaren Teilchen hat sich in den letzten Jahrzehnten das Standardmodell etabliert. Im Rahmen dieser Theorie, die auf wenigen fundamentalen Teilchen und entsprechenden Wechselwirkungen zwischen diesen basiert, sind die Nukleonen aus leichten Quarks zusammengesetzt, welche durch die Bosonen der starken Wechselwirkung, die Gluonen, gebunden sind.

Die zugrunde liegende Feldtheorie der starken Wechselwirkung ist die Quantenchromodynamik (QCD). Eine störungstheoretische Entwicklung der QCD erweist sich dabei als sehr erfolgreich zur Beschreibung des Aufbaus der Materie bei hinreichend hohen Energien oder Impulsüberträgen. Das Anwachsen der Kopplungskonstante bei kleinen Energien und großen Abständen (*confinement*) erlaubt es aber nicht, diese Theorie auf kleine Energien oder Impulsüberträge auszudehnen. Dies gilt insbesondere für die Beschreibung kollektiver Phänomene, wie die Bindung der Nukleonen im Atomkern oder der Struktur der Nukleonen und ihrer angeregten Zustände, den *Resonanzen*. Auch ein Zugang mit kernphysikalischen Methoden ist hierfür wenig geeignet, da etwa Schalenmodelle schwerer Kerne die elementare Wechselwirkung einzelner Nukleonenbestandteile nicht berücksichtigen. Somit ist die dynamische und statische Struktur des Nukleons in diesem »mittleren« Energiebereich trotz verschiedener Theorieansätze, wie etwa effektiver Potentialmodelle oder der chiralen Störungstheorie, in der Regel nur phänomenologisch gut fassbar. Hier setzt nun die Mittlere Energie- oder Hadronenphysik an, deren Aufgabe darin besteht, die Methoden der Hochenergie-Elementarteilchenphysik so zu erweitern, dass ein Übergang zwischen den fundamentalen Freiheitsgraden der QCD — Stromquarks und Gluonen — hin zu den effektiven Freiheitsgraden, wie etwa den Konstituentenquarks, die sich zur Beschreibung der niederenergetischen Phänomene als erfolgreich erwiesen haben, zu entwickeln.

Die Existenz innerer Freiheitsgrade der Nukleonen zeigt sich beispielsweise in ihrer endlichen Ausdehnung, dem anomalen magnetischen Moment oder den elektromagnetischen Polarisierbarkeiten. Eine Anregung dieser Freiheitsgrade führt zu einem komplexen Spektrum, dessen Zustände mit den Baryonresonanzen (Δ , N^*) identifiziert werden. Die Anregung und der Zerfall dieser Resonanzen ist eng mit den *Mesonen* (π , η , ρ , ...) verknüpft, die als Quark-Antiquark-Paare mit zu den wichtigsten Teilchen der Mittlere Energie- bzw. Hadronenphysik zählen. Das genaue Studium des Anregungsschemas des Protons und Neutrons in Form differentieller Wirkungsquerschnitte stellt das entscheidende Bin-

deglied zwischen experimentell direkt zugänglichen Größen und fundamentalen Eigenschaften der Nukleonen dar. Sowohl ein konkretes Nukleonmodell, als auch eine fundamentale oder phänomenologische Beschreibung sollten das Anregungsspektrum möglichst gut widerspiegeln und daraus typische Daten, wie beispielsweise die Polarisierbarkeiten, ableiten.

Die Arbeitsgruppe Mittelernergiephysik des Zweiten Physikalischen Instituts der Universität Göttingen unter der Leitung von Prof. Dr. M. Schumacher hat sich die Aufgabe gestellt, die Hadronenstruktur theoretisch und insbesondere auch experimentell mit Hilfe von Reaktionen mit reellen Photonen zu untersuchen. Der besondere Vorteil der Verwendung von Photonen als Sonde liegt darin, dass diese rein elektromagnetisch wechselwirken, womit der Eingangsvertex entsprechender Reaktionen im Rahmen der Quantenelektrodynamik beschrieben werden kann und somit hierfür nicht auf die sehr aufwendigen Rechenmethoden der QCD zurückgegriffen werden muss.

Betrachtet man die möglichen Reaktionen an einem Nukleon im Eingangskanal, so stellt man fest, dass es in der Regel zur Produktion von Mesonen kommt, wobei die Ein-Pionproduktion ($\gamma N \rightarrow \pi N$) dominiert. Abbildung 1.1 zeigt den totalen Wirkungsquerschnitt für die Summe aller Mesonproduktionskanäle im Vergleich mit der Comptonstreuung am Proton. Deutlich zu erkennen ist der erste angeregte Zustand des Nukleons — die Δ -Resonanz bei 330 MeV — sowie einige weitere Resonanzen, die wegen ihrer Breite nicht mehr vollständig getrennt identifiziert werden können und zum zweiten Resonanzgebiet zusammengefasst werden. Neben einer Vielzahl weiterer sehr schwacher und nicht genau bekannter Anregungszustände ist auch ein nichtresonanter Beitrag zu erkennen, der den Wirkungsquerschnitt für hohe Energien dominiert.

Die Pionproduktionsreaktionen sind im Energiebereich bis zum zweiten Resonanzgebiet auch in ihrer Winkelabhängigkeit in den letzten Jahren unter anderem an den Beschleunigeranlagen ELSA (Bonn), LEGS (Brookhaven) und MAMI (Mainz) gut vermessen worden. Mittlerweile existieren für diese Reaktionen einige 10000 Datenpunkte. Trotzdem existiert noch kein einzelnes allgemein akzeptiertes Modell zur vollständigen Beschreibung aller gemessener Daten. Insbesondere die Entwicklung der Streuamplituden der einzelnen Resonanzen nach Multipolordnungen und damit das Verständnis der zu Grunde liegenden Reaktionsmechanismen ist Gegenstand aktueller Diskussionen.

Vom theoretischen Standpunkt her ist die Messung der elastischen Streuung (*Comptonstreuung* $\gamma N \rightarrow \gamma N$) besonders reizvoll, da hier nicht nur der Eingangs- sondern auch der hierzu symmetrische Ausgangsvertex über die Quantenelektrodynamik gegeben ist. Trotzdem sind bislang nur vereinzelte Experimente zur Comptonstreuung durchgeführt worden, da die um zwei Größenordnungen kleineren Wirkungsquerschnitte im Vergleich zur Pion-Produktion nur unter großen experimentellen Anstrengungen gemessen werden können. Erst vor kurzem ist es mit dem von der Arbeitsgruppe Mittelernergiephysik in Göttingen koordinierten LARA-Experiment [Gal01] gelungen, differentielle Wirkungsquerschnitte innerhalb eines großen kinematischen Bereiches ($E_\gamma = 200$ bis 800 MeV, $\theta_\gamma^{\text{lab}} = 30$ bis 150°) zu ermitteln.

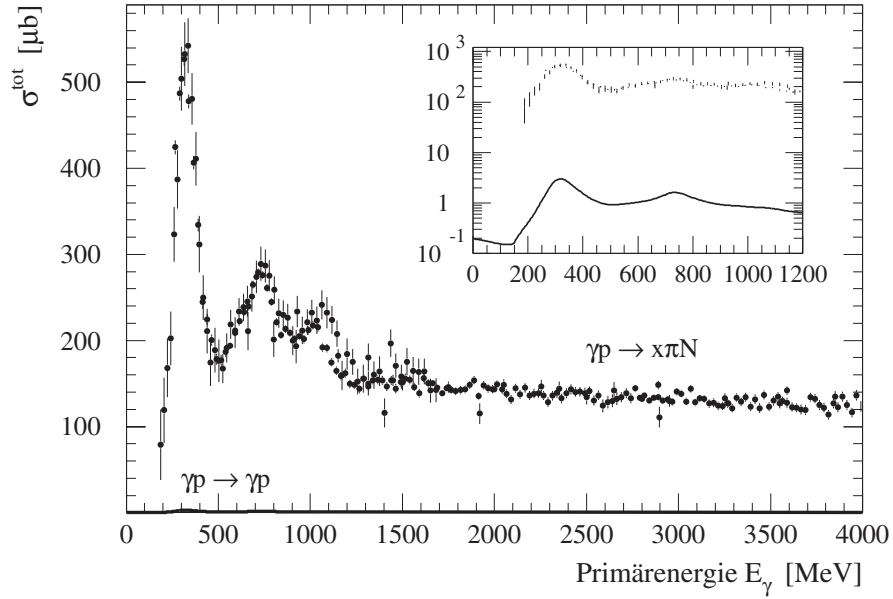


Abbildung 1.1: Totaler Wirkungsquerschnitt für die für die Meson-Produktionsreaktionen [Gro00] (Punkte mit Fehlerbalken) im Vergleich mit der um zwei Größenordnungen schwächeren elastischen Streuung (Comptonstreuung $\gamma p \rightarrow \gamma p$) [Lvo01b] am Proton. Die kleine Abbildung zeigt die Wirkungsquerschnitte bis zu Primärenergien von $E_\gamma = 1200 \text{ MeV}$ in logarithmischer Auftragung. Erst hier ist der Verlauf der Comptonstreuung zu erkennen.

In dieser Arbeit wird das SENECA-NaJ-Experiment vorgestellt, das im Rahmen der A2-Kollaboration am MAMI-Beschleuniger ausgeführt wurde. Mit diesem Experiment ist die freie Comptonstreuung und π° -Photoproduktion am Proton unter einem Laborstreuwinkel von 136° im Bereich der ersten Resonanz vermessen worden. Motiviert durch ein von der LEGS-Kollaboration ausgeführtes Experiment [Ton98] im Streuwinkelbereich $\theta \leq 125^\circ$ existieren gerade unter starken Rückwärtswinkeln verschiedene theoretische Vorhersagen, die sich in ihren Annahmen über die Protonenstruktur grundlegend widersprechen. Das SENECA-NaJ-Experiment besitzt die nötige Genauigkeit, um die Entwicklung der Modellvorstellung des Protons entscheidend zu beeinflussen. Daneben ist der Experimentaufbau so konzipiert, dass zusätzlich sogenannte *quasi-freie* Messungen an einem Deuteriumtarget durchgeführt werden können. Hierbei betrachtet man die Streuung bzw. π° -Produktion an einem im Deuteron gebundenen Proton, unter der Bedingung, daß der Impulsübertrag auf das zweite Nukleon, das Neutron, minimal ist. Mit dem SENECA-NaJ-Experiment ist hierdurch ein direkter Vergleich zwischen den freien und quasi-freien Reaktionen mit demselben Experimentaufbau möglich. Somit kann studiert werden, wie sich die Eigenschaften des Protons unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit dem Neutron verändern und ob sie von bestehenden Theorien richtig erfasst werden. Dies ist von besonderer Bedeutung, da neben der quasi-freien Streuung am Proton, auch die in die-

ser Arbeit nicht diskutierten Reaktionen am im Deuteron gebundenen Neutron vermessen werden können (vgl. [Kos01]). Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die Eigenschaften des ungeladenen Nukleons zu ermitteln, was im Gegensatz zum Proton wegen fehlender freier Neutronentargets nicht direkt möglich ist.

In dieser Arbeit wird zunächst eine Einführung in die theoretischen Grundlagen der freien und quasi-freien Comptonstreuung und π^0 -Produktion gegeben, an die sich eine Diskussion der entsprechenden Reaktionskinematiken anschließt. Aus diesen Überlegungen heraus resultiert der im Kapitel 4 vorgestellte Experimentaufbau. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der anschließenden Erläuterung der für dieses Experiment spezifischen kinematischen Analysemethoden mehr Raum eingeräumt worden als der technischen Beschreibung der einzelnen Detektorkomponenten und ihrer Messelektronik. Die mit dem SENECA-NaJ-Experiment erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 6 vorgestellt, im Rahmen der weitgehend phänomenologischen Dispersionstheorie diskutiert und — soweit vorhanden — mit Daten anderer Experimente verglichen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sind mit Blick auf zukünftige Fragestellungen der Hadronenphysik im Kapitel 7 zusammengefasst.