

**Wissenschaftlicher Abschlussbericht**  
**für den Zeitraum 1.7.2006 – 30.6.2009**  
über das  
**Forschungsvorhaben 06 ER 141**

*„COMPASS Experiment:  
Untersuchung zur Spektroskopie  
und Struktur von Hadronen“*

Projektleiter: Wolfgang Eyrich

Erlangen, im September 2009

## Vorwort

Die Erlanger Arbeitsgruppe ist seit Beginn am COMPASS-Experiment beteiligt. Im apparativen Bereich ist unser Hauptbeitrag Bau und Betreuung von Hodoskopen aus szintillierenden Fasern, die sowohl im Spektrometerbereich als auch im Bereich der Beam-Momentum-Station eingesetzt sind. Außerdem hat die Erlanger Gruppe wesentliche Beiträge beim Upgrade des RICH-Detektors geleistet. Bei der Durchführung der Strahlzeiten war die Arbeitsgruppe mit jeweils 6 Personen aktiv bei der Vorbereitung und im Schichtbetrieb beteiligt. Ebenso sind wir bei der Analyse der Daten beteiligt, wobei der Arbeitsschwerpunkt bei den transversalen Spinfunktionen liegt.

Folgende Wissenschaftler waren von Erlanger Seite im Berichtszeitraum an den Aktivitäten an COMPASS beteiligt:

*Prof. Dr. W. Eyrich (Projektleiter), PD Dr. A. Lehmann, Dr. C. Pizzolotto, Dr. P. Schönmeier, Dr. W. Schroeder, Dr. A. Teufel, Dipl. Phys. A. Richter (Doktorand), Dipl. Phys. Ch. Adolph (Doktorand)*

Außerdem waren in das Vorhaben zwei Diplomanden eingebunden.

Im Berichtszeitraum wurden von der Erlanger Gruppe antragsgemäß folgende Themen bearbeitet:

### Im apparativen Bereich

- Betrieb und Wartung der Hodoskope aus szintillierenden Fasern im Spektrometerbereich
- Betrieb und Wartung der Beam-Momentum-Station unter Einschluss der dort eingesetzten neuen Hodoskope aus szintillierenden Fasern
- Software-Entwicklung zur Echtzeitüberwachung der Signalamplituden aller Faserkanäle, Eichung und Langzeitstabilitätsanalyse der Faserhodoskope im Spektrometerbereich
- Qualitätskontrolle der Multi-Anoden-Photomultiplier für das RICH Upgrade Projekt und Anlage und Einpflege einer Datenbank. Betriebskontrolle dieser Photomultiplier

### Im Bereich der Datenaufbereitung und Datenanalyse

- Beteiligung an der allgemeinen Datenauswertung mit Schwerpunkt „Transversity“
- Studien zur Produktion von  $\phi$ -Mesonen in  $\mu$ -induzierten Reaktionen
- Beteiligung an der Optimierung der Spursuche und -rekonstruktion
- Wahrnehmung der Funktion des „CORAL Librarian“

Im folgenden wird auf die einzelnen Aktivitäten der Erlanger Arbeitsgruppe eingegangen.

Eine Übersicht über die Aktivitäten der gesamten COMPASS Kollaboration wird in dem beiliegenden COMPASS Status Report 2009 an das CERN-SPSC vom 26. 6. 2009 gegeben.

# Erlanger Aktivitäten am COMPASS Experiment

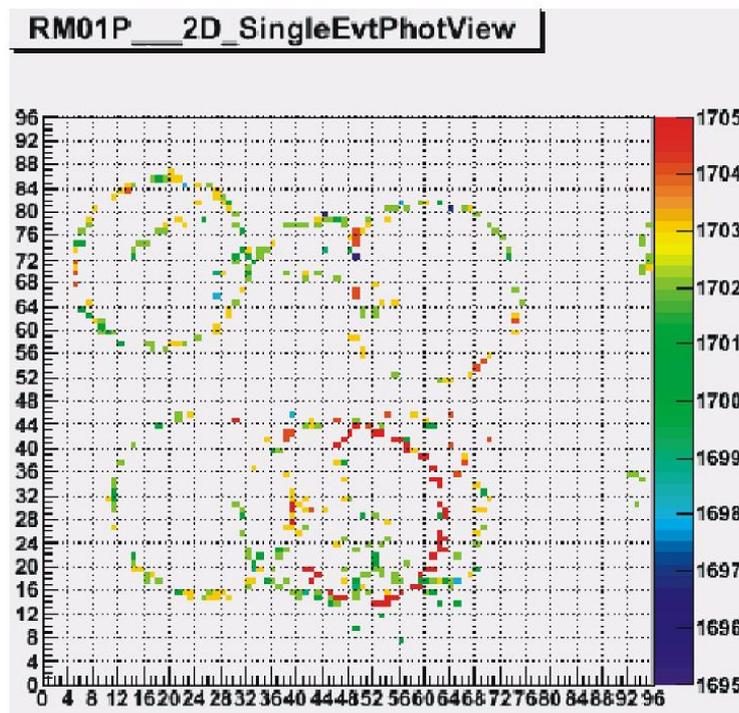
## Apparativer Bereich

Während der Strahlzeiten war unsere Arbeitsgruppe im apparativen Bereich neben der standardmäßigen Betreuung der Bonn/Erlanger SciFi Detektoren und der Beam-Momentum-Station (BMS) auch für den Betrieb der japanischen SciFi Detektoren zuständig. Darüber hinaus war die Erlanger Gruppe auch in die Wartungs- und Überwachungsaufgaben der ca. 600 Multianoden Photomultiplier (MAPMT) des RICH Detektors aktiv eingebunden.

## **RICH Upgrade Projekt**

Für die Messperioden ab dem Jahr 2006 wurde ein Upgrade des RICH1 Detektors im zentralen Bereich der Photonenauslese durchgeführt. Die Qualitätskontrolle aller im finalen Detektor Setup eingesetzten Multianoden Photomultiplier (MAPMT) wurde in Erlangen an einem eigens dafür konzipierten, automatisierten Messplatz erfolgreich durchgeführt. Inzwischen sind alle, aus den Qualitätsmessungen gewonnenen Erkenntnisse (Rohdaten und Analyseergebnisse) in eine Web basierte Datenbank eingepflegt worden (State of the Art Ruby on Rails Technologie) und stehen jedem Kollaborationspartner zur Verfügung.

Erste, vorläufig analysierte COMPASS Daten aus dem Jahr 2006 zeigen, dass der Detektor alle in ihn gesetzten Erwartungen erfüllt und sogar noch übertrifft. Die Anzahl der nachgewiesenen Photonen ist mit ca. 65 höher als die erwarteten 40 (vor dem Upgrade waren es 14). Die Ringauflösung beträgt jetzt  $\sigma_{\text{Ring}} \sim 0.36$  mrad statt erwartet 0.4 mrad (vorher 0.6 mrad). Die gesamte Nachweis- und Teilchenidentifikationseffizienz ist  $> 95\%$  und erlaubt eine  $\pi / K$  - Separation bis hin zu Impulsen von  $\sim 50$  GeV/c (vorher 43 GeV/c). Abbildung 1a demonstriert die hervorragende Performance des neuen Detektors: Die Farbskalierung kennzeichnet die Zeitstruktur der gemessenen Ringe. So treffen etwa grüne Ringe früher am Photondetektor ein als rote Ringe. Die Zeitauflösung beträgt  $\sigma \sim 300$ ps. Alle mit dem RICH genommenen Daten haben durch den Upgrade eine wesentliche Qualitätssteigerung erfahren.



**Abb. 1a** : Online Event des RICH1 Upgrade Detektor bei COMPASS

## Datenanalyse

### Extraktion transversaler Spineffekte

Der wissenschaftliche Schwerpunkt der Erlanger Arbeitsgruppe lag auch in der vergangenen Förderperiode in der Untersuchung der Spinstruktur des Nukleons mittels tiefinelastischer Myon-Streuung. Hierbei stand vor allem die Erforschung transversaler Spineffekte im Mittelpunkt. Diese Arbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe um J. Bisplinghoff an der Universität Bonn, einer Gruppe des INFN Trieste um F. Bradamante und der Gruppe um K. Königsmann an der Universität Freiburg.

Lange Zeit wurde die Untersuchung transversaler Spineffekte vernachlässigt, da man annahm, dass diese in führender Ordnung der QCD unterdrückt seien. Das überraschende Ergebnis der EMC-Kollaboration, dass der Spin des Protons nur zu einem kleinen Teil vom Spin der Quarks stammt, führte jedoch zu einer erneuten Bewertung der Spinstruktur des Nukleons.

Dabei stellte sich heraus, dass zur vollständigen Beschreibung der partonischen Struktur des Nukleons selbst in führender Ordnung der QCD neben den bekannten über den Spin gemittelten und longitudinalen Quark-Verteilungsfunktionen auch die transversal polarisierten Quark-Verteilungsfunktionen („Transversity“,  $\Delta_T q(x)$ ) bestimmt werden müssen, wobei  $x$  hier die Bjorken'sche Skalenvariable ist, die für den Anteil am Impuls des Nukleons steht, den das getroffene Quark trägt. Auf Grund ihres chiral ungeraden Charakters ist diese Größe in inklusiver tiefinelastischer Streuung nicht zugänglich. Erst eine neue Generation von Streuexperimenten, zu denen das COMPASS Experiment am CERN gehört, macht eine Messung dieser Größe in semi-inklusive tiefinelastischer Streuung möglich, bei der neben dem gestreuten Lepton auch mindestens ein Hadron im Endzustand detektiert wird. Hier ist Transversity nun zugänglich, da es in Verbindung mit einer anderen chiral ungeraden Größe, der Fragmentationsfunktion, gemessen wird.

In diesen Streuexperimenten kann Transversity in drei verschiedenen Kanälen untersucht werden:

- In der Produktion polarisierter Hyperonen (z.B. des  $\Lambda$ -Hyperons), bei der Transversity in Verbindung mit der Fragmentationsfunktion erscheint, die die Erzeugung von polarisierten Hadronen aus polarisierten Quarks beschreibt. Hier hängt das Maß der Polarisation direkt von dem Produkt aus Transversity und Fragmentationsfunktion ab.
- In der Produktion einzelner unpolarisierter Hadronen. Hier wird die Transversity Verteilung in Zusammenhang mit der sogenannten *Collins-Fragmentationsfunktion* ( $H_T^1(z, p_T)$ ) gemessen. Diese Funktion beschreibt die Fragmentation polarisierter Quarks in unpolarisierte Hadronen, bei der eine Korrelation zwischen Quark Spin und dem Transversalimpuls  $p_T$  des Hadrons bezüglich der Quark Richtung entsteht. Dies erzeugt eine azimutale Asymmetrie in der Produktion der Hadronen, die vom Sinus des sogenannten *Collins-Winkels* ( $\Phi_C = \phi_H + \phi_S$ ) abhängt, der sich aus dem Azimutalwinkel des Spins ( $\phi_S$ ) und des Hadrons ( $\phi_H$ ) ergibt. Die Größe  $z$  ist hier der Anteil der in der Streuung übertragenen Energie, den das erzeugte Hadron trägt.
- In der Produktion von unpolarisierten Hadronen-Paaren. Dieser Prozess ist ähnlich der Ein-Hadronen-Produktion, wobei die von den Hadronen aufgespannte Ebene die Rolle des einzelnen Hadrons übernimmt und sich eine azimutale Asymmetrie für diese Produktionsebene ergibt. Hier erscheint Transversity in Verbindung mit einer neuen Fragmentationsfunktion, der sogenannten *Interferenz-Fragmentationsfunktion* (IFF,  $H^{IFF}(z, p_T)$ ).

Alle drei Kanäle werden im Rahmen des COMPASS-Experimentes untersucht, das bisher 20-25% seiner Messzeit mit polarisiertem Myonen-Strahl in transversaler Target-Konfiguration durchgeführt hat.

Die Erlanger Gruppe beteiligt sich an der Analyse der Ein-Hadronen-Produktion, worauf auch insgesamt das Hauptaugenmerk in der Analyse transversaler Spineffekte liegt, da die zugehörige Collins-Fragmentationsfunktion im Rahmen des BELLE-Experimentes am KEK-Beschleuniger in Japan ebenfalls bereits gemessen wurde.

Der Wirkungsquerschnitt für die Streuung von longitudinal polarisierten Leptonen an einem transversal polarisiertem Target zeigt acht Beiträge, vier davon in führender Ordnung, die sich aus verschiedenen Kombinationen von Quark-Verteilungsfunktionen und Fragmentationsfunktionen ergeben und in acht verschiedenen azimutale Asymmetrien resultieren, die von verschiedenen Kombinationen des azimutalen Hadronen- und Spinwinkels abhängen.

Zwar ist der Collins Effekt der einzige Beitrag, der bei Integration über den Transversalimpuls der Quarks verbleibt, aber zum Verständnis der transversalen Struktur ist es notwendig, sich neben dem transversalen Spin auch mit den vom Transversalimpuls abhängigen (*Transverse Momentum Dependent: TMD*) Verteilungen zu befassen. Nur unter Berücksichtigung des vollständigen Impulses der Partonen und dessen Zusammenhang mit dem Spin des Nukleons ist es möglich, z.B. auch den Beitrag des Bahndrehimpulses der Partonen zum Spin des Nukleons zu verstehen.

Unter den zusätzlichen Beiträgen hat vor allem die sogenannte Sivers-Funktion  $f_{1T}^{\perp}(x, k_{\perp}^2)$  in den letzten Jahren sehr großes Interesse hervorgerufen, die ebenfalls eine mögliche Ursache für azimutale Asymmetrien an einem transversal polarisierten Target ist. Die Annahme hier ist, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Transversalimpuls der Quarks und der transversalen Polarisation des Nukleons gibt. Hierbei spielt die transversale Polarisation der Quarks keine Rolle, sondern die Sivers-Funktion beschreibt eine Asymmetrie in der Verteilung der transversalen Quark-Impulse. Dieser Effekt erzeugt ebenfalls eine azimutale Asymmetrie in der Produktion der Hadronen, die jedoch vom Sinus des *Sivers-Winkels* ( $\Phi_S = \phi_H - \phi_S$ ) abhängt, der sich ebenfalls aus dem Azimutalwinkel des Spins ( $\phi_S$ ) und des Hadrons ( $\phi_H$ ) ergibt. Diese messbare Asymmetrie hängt dann vom Produkt der Sivers-Funktion und der bekannten unpolarisierten Fragmentations-Funktion  $D_1^h(z)$  ab.

Neuere theoretische Überlegungen zeigen, dass eine nicht verschwindende Sivers-Funktion mit dem Anteil des Parton-Drehimpulses am Spin des Nukleons in Verbindung gebracht werden kann.

Daher ist es wichtig, ebenso diesen Beitrag zu bestimmen, was aufgrund der Abhängigkeit des Sivers-Beitrags von einer unabhängigen Kombination der Winkel von Spin und Hadron simultan möglich ist.

Das COMPASS Experiment verfügt über ein Target, das sowohl longitudinal als auch transversal zum einlaufenden Myonenstrahl polarisiert werden kann. Während in den Jahren 2002, 2003 und 2004 an einem transversal polarisiertem  ${}^6\text{LiD}$ -Target (effektives Deuterium-Target) bestehend aus zwei Zellen gemessen wurde, kam im Jahr 2007 ein transversal polarisiertes  $\text{NH}_3$ -Target (effektives Protonen-Target) mit drei Zellen zum Einsatz.

Die Messung an einem Proton- und einem Deuterium-Target ermöglicht, die Beiträge von Proton und Neutron zu bestimmen und damit auch die Verteilungsfunktionen der u- und d-Quarks separat zu bestimmen.

Der Fokus der Analyse in der vergangenen Förderperiode lag auf dem Abschluss der Analyse der Daten, die von 2002-2004 am Deuterium-Target aufgenommen wurden und auf der Analyse der Daten, die in der Messperiode 2007 am Proton-Target genommen wurden.

Gegen Ende der vorangehenden Förderperiode war der Status der Analyse, dass die Daten der Messperiode 2002 in Bezug auf die Collins und Sivers Asymmetrien komplett ausgewertet