

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: *Johannes-Gutenberg-Universität Mainz*

Projektleitung: *Prof. Dr. Josef Pochodzalla/ Prof. Dr. Michael Ostrick*

Verbund: *05P2015 COMPASS*

Thema: *Untersuchung der Hadronstruktur mittels tiefvirtueller Comptonstreuung und Drell-Yan-Prozessen, flavourseparierte Quarkverteilungen und Fragmentation, Triggersystem, Rückstoßprotonennachweis*

## Zusammenfassung

Der folgende Bericht gibt einen Überblick über die Aktivitäten der Mainzer Gruppe am COMPASS-Experiment am CERN. Das Experimentierprogramm ist im genehmigten COMPASS II-Proposal festgelegt. Im Berichtszeitraum lag der Schwerpunkt auf der Durchführung der Messungen zur Drell-Yan-Produktion in 2015 und 2018 sowie der Messung tiefvirtueller Comptonstreuung (DVCS) in 2016 und 2017. Während der Datennahmen wurde das gesamte Trigger- und Vetosystem zusammen mit der Gruppe Klein aus Bonn betreut. Für die DVCS-Messungen waren wir zudem an der Betreuung des Rückstoßprotonendetektors beteiligt. Im Winter 2015/16 und 2017/18 wurde jeweils das Triggersystem für die anstehenden Messungen neu konfiguriert.

Die Mainzer Gruppe ist maßgeblich an Analysen vor allem der Myonstrahlraten beteiligt. So wurden longitudinale Asymmetrien und Spinstrukturfunktionen bestimmt, polarisierte Quarkverteilungen extrahiert und Multiplizitäten und Fragmentationsfunktionen von Pionen und Kaonen gemessen. Außerdem wurde mit der Analyse der Daten zur tiefvirtuellen Comptonstreuung begonnen.

---

<sup>1</sup>Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

# Bericht

## **1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

In den Berichtszeitraum fällt die Fortsetzung der Messungen des genehmigten COMPASS II-Proposals [1].

Mittels tiefvirtueller Comptonstreuung und harter exklusiver Mesonproduktion wird die 3-dimensionale Verteilung von Partonen (Gluonen und Quarks) im Nukleon untersucht, d.h. Nukleon-„Tomographie“ durchgeführt, eine der ganz aktuellen Fragestellungen der Hadronphysik. Die Untersuchung von Myonpaaren, wie sie in Hadron-Hadron-Wechselwirkungen produziert werden, den sogenannten Drell-Yan(DY)-Prozessen, erlaubt den Zugriff auf weitere Details der Nukleonstruktur, insbesondere auf Korrelationen mit Transversalimpulsbeiträgen von Partonen, wie sie in vielen Experimenten weltweit untersucht werden. Die ersten Messungen mit polarisiertem Target, wie sie bei COMPASS durchgeführt werden, erlauben eine fundamentale Vorhersage zu überprüfen, nämlich den Vorzeichenwechsel für einige Korrelationen, wie z.B. der Siversfunktion, zwischen Messungen mit tiefinelastischer Leptonstreuung und DY-Prozessen. Mit den Messungen von 2015 bis 2018 kann die COMPASS-Kollaboration einen wesentlichen Beitrag zu den genannten Fragestellungen leisten, wie dies im Experimentproposal COMPASS II [1] dargelegt ist.

Die Mainzer Gruppe war zusammen mit Bonn (Klein) für den Umbau und die Betreuung des Trigger- und Vetosystems für die verschiedenen Messungen verantwortlich. Zusammen mit den Gruppen aus Saclay, Freiburg und Warschau hat die Mainzer Gruppe zudem für die DVCS-Messungen 2016/17 den Rückstoßprotodetektor gewartet und betreut.

## **2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Von der COMPASS-Kollaboration wurde seit 2002 in Messungen mit Myonstrahlen die longitudinale und transversale Spinstruktur des Nukleons in tiefinelastischer Myon-Nukleon-Streuung (DIS) untersucht und Messungen zur Hadronspektroskopie mit Pion- und Protonstrahlen durchgeführt. Die DIS-Messungen wurden 2011 mit einer Datennahme zur longitudinalen Spinstruktur des Protons abgeschlossen.

Seit 2012 wurden in der Phase II des COMPASS-Experiments die physikalischen Fragestellungen erweitert [1]. So wird die 3-dimensionale Struktur des Nukleons in exklusiven Lepton-Nukleon-Prozessen wie der tiefvirtuellen Comptonstreuung (DVCS) und harter exklusiver Vektormesonproduktion (HEMP) untersucht. Als alternativer Ansatz werden nicht-integrierte, transversalimpulsabhängige Verteilungen in Drell-Yan-Reaktionen studiert.

Für die genannten Messungen stand das COMPASS-Spektrometer an der M2-Strahlführung des CERN-SPS zur Verfügung. Für die verschiedenen Meßprogramme müssen jeweils Targetbereich und Triggersystem an die physikalischen Fragestellungen angepaßt werden.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

In 2015 wurde die erste Meßzeit zur Untersuchung von DY-Prozessen mit Pionstrahlen und polarisiertem Protontarget durchgeführt. Dabei handelt es sich um die erste Messung von DY-Prozessen mit Polarisationsfreiheitsgraden. In der zur Verfügung stehenden Strahlzeit konnte die beantragte und genehmigte Datenstatistik nicht erreicht werden, so daß eine weitere DY-Strahlzeit für 2018 beantragt (und genehmigt) wurde, sobald klar wurde, daß der ursprünglich für 2018 geplante Shutdown der Beschleunigeranlagen am CERN um ein Jahr verschoben wird.

In Winter 2015/2016 fand der Umbau des Experiments für die DVCS-Messungen statt. Hierfür mußte das Triggersystem gewartet und neu konfiguriert werden und der Rückstoßprotodetektor mit Flüssigwasserstofftarget wieder installiert werden. Gleichzeitig wurde die innere Szintillatorlage des Rückstoßprotodetektors erneuert.

In den folgenden zwei Meßperioden 2016 und 2017 wurden sehr erfolgreich DVCS-Messungen mit positiv und negativ geladenen Myonstrahlen von 160 GeV durchgeführt. Für diese Messungen hat die Mainzer Gruppe bis Ende Juni 2016 den technischen Koordinator des COMPASS-Experiments gestellt.

Im Wintershutdown 2017/2018 wurde der Umbau für DY-Messungen durchgeführt, d.h. das Flüssigwasserstofftarget mit dem CAMERA-Detektor wurde ausgebaut, das polarisierte Target und der Hadronabsorber wieder installiert. Außerdem wurde das Triggersystem umgebaut und der Dimyontrigger implementiert. Die DY-Messungen wurden im November 2018 abgeschlossen.

#### 3.1 Beiträge zum Experiment

**CAMERA** Der Rückstoßprotodetektor (CAMERA) basiert auf der Messung der Teilchenflugzeit zwischen zwei zylindrischen Lagen von Szintillatorelementen im Abstand von 85 cm. Er wurde gemeinsam durch die Gruppen aus Saclay, Freiburg, Warschau und Mainz aufgebaut. Neben der Durchtrittszeit wird in der inneren Lage der Energieverlust und in der äußeren Lage die Gesamtenergie der Protonen (falls sie gestoppt werden) gemessen. Innerhalb von CAMERA befindet sich das 2.5 m lange Target mit flüssigem Wasserstoff.

In 2012 hatte sich herausgestellt, daß die Szintillatoren für die innere Lage nicht die erforderlichen großen Abschwächlängen erreichten, um eine hinreichende Effizienz und Zeitauflösung zu erzielen. Die Szintillatoren der inneren Lage wurden im Herbst 2015 ausgetauscht, nachdem zuvor in aufwendigen Tests sichergestellt wurde, daß das gelieferte Szintillatormaterial die gewünschten Spezifikationen erfüllt. In Zusammenarbeit der Gruppen aus Saclay, Freiburg, Warschau und Mainz wurde die innere Lage neu bestückt und mit kosmischen Myonen sorgfältig getestet. Für alle Elemente der neuen inneren Lage wurden Abschwächlängen von mehr als 1.5 m erreicht, wie sie für eine hinreichende Effizienz und Zeitauflösung unabdingbar sind.

**Triggersystem** Das Triggersystem wurde im Berichtszeitraum mehrfach umgebaut, da DVCS- und Drell-Yan-Programm unterschiedliche Anforderungen vor allem im zentralen Bereich der Triggerhodoskope stellen. Alle Arbeiten und die Betreuung des Trigger-

und Vetosystems wurden gemeinsam mit der Gruppe Klein (Bonn) durchgeführt. Bei DY-Messungen muß mit möglichst gleicher Akzeptanz auf positiv und negativ geladene Myonen getriggert werden, um daraus den gewünschten Dimyontrigger bilden zu können. Daher sind die verwendeten Hodoskopsysteme symmetrisch zur Strahlposition aufgebaut. Für die DVCS-Messungen müssen gestreute Myonen selektiert werden, was auf Grund des Energieverlusts bei der Wechselwirkung nach Ablenkung in den Spektrometernagneten eine nicht-strahlsymmetrische Akzeptanz nötig macht. Im Winter 2015/16 mußte die DVCS-Geometrie wiederhergestellt werden, indem im zentralen Bereich des äußeren Triggersystems die Akzeptanz an die Kinematik der interessanten Ereignisse mit Impulsüberträgen von mehr als  $1 \text{ (GeV}/c)^2$  angepaßt wurde. Der zweite im Förderantrag noch nicht enthaltene Umbau im Winter 2017/18 für die DY-Messungen 2018 betraf wiederum das äußere Triggersystem. Dabei wurden auch etliche Wartungsarbeiten zur Konsolidierung der Triggerperformance durchgeführt. Das vordere Hodoskop des äußeren Triggersystems steht im starken Streufeld des zweiten Spektrometernagneten. Es zeigte sich, daß einige der Mumetallabschirmungen im zentralen Bereich nicht mehr hinreichend gut abschirmten, so daß für diese Abschirmungen Ersatz beschafft wurde. Die hohen Anforderungen der DY-Datennahme (erhöhte Strahlintensität, Wirkungsquerschnittsmessungen) machten zudem eine Verbesserung der Qualität des auf FPGA-Logik beruhenden Dimyontriggers nötig. Darüberhinaus wurde die Online-Überwachung des gesamten Trigger- und Vetosystems im Hinblick auf Stabilität von Zeitkalibration und Effizienz durch Ausbau und Modernisierung des bestehenden Computersystems der Triggergruppe verbessert. Die meisten dieser Arbeiten wurden im Rahmen von zwei Masterarbeiten (Becker [36] und Veit [38]) sowie einer laufenden Doktorarbeit durchgeführt.

### 3.2 Datenanalyse

Die Arbeitsgruppe ist an zahlreichen Analysen beteiligt: Untersuchung der longitudinalen Spinstruktur des Nukleon, Bestimmung von Hadronmultiplizitäten und Messung von DVCS-Wirkungsquerschnitten.

**Spinstruktur des Nukleons** Die Untersuchung der longitudinalen Spinstruktur des Nukleons wurde mit der Doktorarbeit vom M. Wilfert [40] abgeschlossen. Aus den 2011 mit longitudinal polarisiertem  $\text{NH}_3$ -Target bei 200 GeV Strahlenergie gemessenen Daten wurden inklusive Asymmetrien und die Spinstrukturfunktion  $g_1^p$  bestimmt [4]. Neben  $g_1^p$  aus den 2011 gemessenen Daten ist nunmehr auch das endgültige COMPASS-Ergebnis für die Deuteronspinstrukturfunktion  $g_1^d$  veröffentlicht und der Beitrag von Quarkspins zum Nukleonspin extrahiert worden [10]. Neben den Daten zu großen Impulsüberträgen  $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2/c^2$  wurden auch Asymmetrien und die Spinstrukturfunktion  $g_1^p$  bei kleinen Impulsüberträgen  $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2/c^2$ , und damit kleinen Quarkimpulsbruchteilen  $x$  bis hinunter zu  $4 \times 10^{-5}$  bestimmt. Erstmals wurden mit polarisierten Protonen Spineffekte von 1% bei diesen kleinen Werten von  $x$  beobachtet [14], während die schon früher veröffentlichten Ergebnisse mit polarisierten Deuteronen verträglich mit Null sind. In Abb. 1 sind die Ergebnisse für die Protonstrukturfunktionen im Vergleich zu Modellvorhersagen dargestellt.

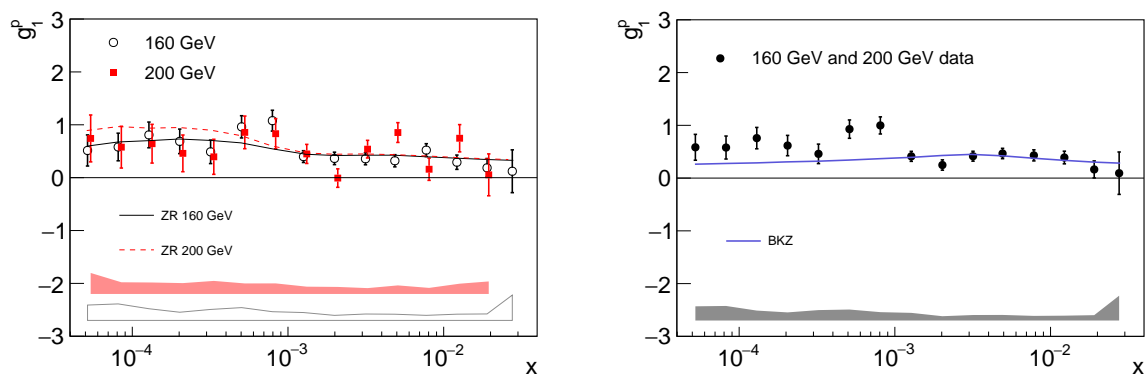


Abbildung 1: Resultate für  $g_1^p$  in Abhängigkeit von  $x$  im Vergleich zu Modellvorhersagen, (links) separat für 200 GeV und 160 GeV Daten, (rechts) für die gemittelten Ergebnisse.

**Multiplizitäten geladener Hadronen** Ein Schwerpunkt der Mainzer Datenanalyse ist die Bestimmung von Hadronmultiplizitäten in der tiefinelastischen Myon-Nukleon-Streuung. Im Berichtszeitraum wurde die Analyse von Multiplizitäten geladener Hadronen, identifizierter Pionen und Kaonen, die aus den 2006 mit isoskalarem  ${}^6\text{LiD}$ -Target gemessenen Daten extrahiert wurden, abgeschlossen [7, 9]. Diese Multiplizitäten sind Gegenstand der mittlerweile fertiggestellten Doktorarbeit von N. du Fresne [39]. Zudem wurde aus den Piondaten in einer LO-QCD-Analyse die favorisierte und nicht-favorisierte Quark-zu-Pion-Fragmentationsfunktion bestimmt [7]. Bei der Interpretation der Multiplizitäten geladener Kaonen durch Fragmentationsfunktionen zeigten sich unerwartete Schwierigkeiten bei Kaonen, die einen Großteil der Energie des ausgetauschten virtuellen Photons tragen. Daher wurde eine separate Analyse des  $K^-/K^+$ -Verhältnisses bei sehr hohen Energieanteilen  $z$  durchgeführt. Wie Abb. 2 zeigt, weicht das Verhältnis zunehmend von der Erwartung ab [15]. Diese Beobachtung zeigt, daß im Rahmen perturbativer QCD Korrekturen nötig sind, die den für die Hadronisation verfügbaren Phasenraum berücksichtigen.

Auch aus den 2012 und 2016/17 mit dem Wasserstofftarget parallel zu den DVCS-Daten gemessenen Ereignisse werden Multiplizitäten bestimmt. Die 2012er Daten hat J. Giarra im Rahmen seiner Masterarbeit [37] analysiert. Die Untersuchung von Hadronmultiplizitäten wird jetzt in einer Doktorarbeit mit den 2016/17er Daten fortgesetzt. Dabei wurde zunächst eine weitere Verbesserung der Akzeptanzkorrektur durch Berücksichtigung der Änderung der kinematischen Variablen durch die Abstrahlung reeller Bremsstrahlungsphotonen in der Monte-Carlo-Simulation erzielt. Dazu wurde der zusätzliche Generator DJANGO [2] in das COMPASS Monte-Carlo-Programm integriert. Der Vergleich von Daten und Monte-Carlo-Simulation für Elektronen zeigt, daß die Daten nunmehr erfolgreich durch die Simulation beschrieben werden.

**Tiefvirtuelle Comptonstrahlung** In einer weiteren Doktorarbeit wurde im Herbst 2016 mit den Analyse der 2016/17er DVCS-Daten begonnen. Da hier Wirkungsquerschnittsdifferenzen bestimmt werden sollen, ist eine sehr genaue Kenntnis von Luminosität und Akzeptanz unabdingbar. Der Mainzer Beitrag konzentriert sich im Moment auf die Bestimmung des einlaufenden Myonflusses, der Untersuchung der Datenstabilität auf

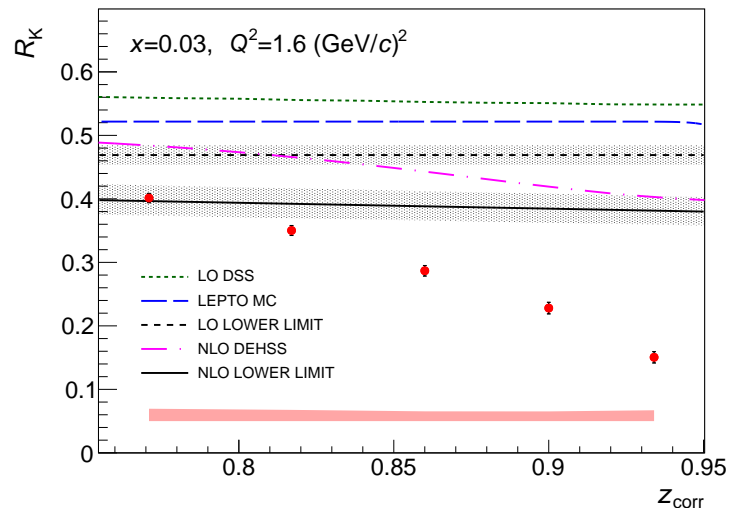


Abbildung 2: Verhältnis  $R_K$  der Multiplizitäten von negativen und positiven Kaonen in Abhängigkeit von  $z$ . Die Kurven sind QCD-Vorhersagen in führender (LO) und nächst-zu-führender (NLO) Ordnung.

Spillbasis und der Bestimmung von Triggereffizienzen, während z.B. die Kalibration der elektromagnetischen Kalorimeter in Saclay durchgeführt wird.

**Weitere Aktivitäten** Vorläufige Ergebnisse aller Mainzer Doktoranden wurden auf den Frühjahrstagungen der DPG in 2016 [25], 2017 [26] und 2018 [27] und auf mehreren internationalen Tagungen [23, 24] präsentiert.

Darüberhinaus stellt die Mainzer Gruppe die Leitung der Analysegruppe zur tiefinelastischen inklusiven und semi-inklusive Streuung der COMPASS-Kollaboration. Bis Juni 2017 hat die Mainzer Gruppe den Technischen Koordinator und seit Oktober 2017 den Leiter der Collaboration Boards gestellt.

Es wurden maßgebliche Beiträge bei der Erstellung zahlreicher Publikationen geleistet, darunter eine detaillierte Beschreibung des Spektrometers für die Messungen mit Hadronstrahlen [3], die Messung von Spinstrukturfunktionen [4, 10, 14] und Messungen der Gluonpolarisation [6, 11]. Fertiggestellt wurden auch mehrere Publikationen zur Messung von Multiplizitäten [7, 9, 13, 15], die Messung von exklusiver Omegaproduktion [8], Messungen mit transversal polarisiertem Target [5, 12] und eine ausführliche Darstellung von Ergebnissen der Pionproduktion von Mesonresonanzen [16].

Zur Zeit sind weitere Veröffentlichungen mit maßgeblicher Mainzer Beteiligung in Vorbereitung, so z.B. "Transverse extension of partons in the proton probed in the sea quark range by measuring the DVCS cross section" (für PLB) und "Measurement of the  $\pi^0$  cross section in hard exclusive leptonproduction" (für PLB).

## **4 Verwendung der Zuwendung**

Die Investitionsausgaben betragen insgesamt 60446€. Davon wurden Common fund Beiträge für 6 Personen für ein Jahr, die meisten Szintillatoren für die neue innere Lage von CAMERA, der zweimalige Umbau des äußeren Triggersystems und die Wartung, Reparatur und Weiterentwicklung von Trigger- und Vetosystem während der 4 Meßkampagnen 2015-2018 finanziert.

Für die Betreuung des Triggersystems, Datennahmeschichten und Übernahmen der wöchentlichen Experimentkoordination fielen Reisekosten von insgesamt 26010€ an einschließlich von Pauschalen für längerfristige CERN-Aufenthalte. Für Reisen zu Tagungen, auf denen COMPASS-Ergebnisse vorgestellt wurden, und Arbeitstreffen wurden 28023€ der gesamten Reisekosten von 54033€ verwendet.

Mit den Personalausgaben von 338729€ wurde eine Postdoc-Stelle über drei Jahre und eine Doktorandenstelle über 1,5 Jahre finanziert. Die Personalmittel enthalten außerdem Ausgaben für den COMPASS Technical Coordinator, für die Reisemittel und Investitionsmittel umgewidmet wurden. Als Gegenleistung wurden der Mainzer Gruppe die Common Fund Beiträge für 2 Jahre gutgeschrieben, Mittel für den ersten Umbau des äußeren Triggersystems zur Verfügung gestellt sowie Reisekostenpauschalen finanziert.

## **5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Zielen**

Das Trigger- und Veteosystem wurde zusammen mit der Gruppe Klein aus Bonn für die Drell-Yan-Messungen in 2015 und 2018 betreut (Arbeitspaket 1). Die Betreuung in 2018, die über den ursprünglichen Förderantrag hinausgeht, konnte durch Umwidmung von Investitionsmitteln sicher gestellt werden. Der Umbau von DY zu DVCS-Messungen (Arbeitspaket 2) wurde erfolgreich durchgeführt. Zusätzlich mußte ein weiterer Umbau von DVCS auf DY-Messungen durchgeführt werden, der wiederum durch Umwidmung von Investitionsmitteln möglich wurde. Direkt zu Beginn der Förderperiode wurde Arbeitspaket 3 (Ersatz der inneren Lage von CAMERA) erfolgreich durchgeführt. Während des DVCS-Messungen 2016 und 2017 wurde zusammen mit Bonn das Trigger- und Vetosystem betreut (Arbeitspaket 4).

Parallel zu den Hardwareaktivitäten wurde in mehreren Master- und Doktorarbeiten an der Datenanalyse gearbeitet. Die Analyse der longitudinalen Asymmetrien (Arbeitspaket 7) wurde abgeschlossen und die Ergebnisse sind veröffentlicht. Multiplizitäten geladener Hadronen wurden in mehreren Arbeiten untersucht (Arbeitspaket 9). Die Ergebnisse der 2006er Daten sind mittlerweile veröffentlicht, der Fokus liegt nunmehr auf den 2016/17er Daten. Seit Herbst 2016 sind wir mit einer Doktorarbeit an der DVCS-Datenanalyse beteiligt (Arbeitspaket 8). Die Arbeitspaket 11-13 enthalten Meilensteine zu Veröffentlichung von DVCS-Ergebnissen. Die Ergebnisse der 2012er Daten wurden 2016 auf der DIS2016 erstmalig vorgestellt und mittlerweile zur Veröffentlichung eingereicht. Auf der DIS2017 wurde ein Statusbericht zur Spin-Physik und 3-dimensionalen Struktur des Nukleon gegeben, der auch den aktuellen Stand der COMPASS DVCS-

Messungen enthielt. Die Präsentation der ersten Ergebnisse der 2016er Messung hat sich auf Grund der hohen Arbeitsbelastung durch die zusätzliche DY-Messung in 2018 etwas verzögert und ist für das Frühjahr 2019 auf der DIS2019 vorgesehen.

## **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Unsere Arbeiten für CAMERA und das Triggersystem sind wesentlichen Voraussetzungen für die erfolgreichen COMPASS-Datenahmen. Die Arbeiten zur Datenanalyse enthalten wesentliche Beiträge zu den unten aufgeführten Veröffentlichungen, zahlreichen Konferenzbeiträgen und den Abschlußarbeiten.

## **7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Es handelt sich um reine Grundlagenforschung. Die Ergebnisse wurden auf zahlreichen Konferenzen vorgestellt und in den entsprechenden Fachzeitschriften publiziert.

## **8 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Uns sind keine Ergebnisse von andere Stelle bekannt.

## **Literatur**

[1] COMPASS, COMPASS-II Proposal, CERN-SPSC-2010-014, SPSC-P-240

[2] H. Spiessberger, DJANGO: Event Generation of ep Interactions at HERA including radiative processes (Version 1.6) (2005), <http://wwwhep.physik.uni-mainz.de/hspiesb/djangoh/djangoh.html>.



## 9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### 9.1 Referierte Publikationen

#### Publikationen mit besonderen Beiträgen der Gruppe:

- [3] COMPASS, P. Abbon et al.  
'The COMPASS setup for physics with hadron beams',  
Nucl. Instr. Meth. A 779 (2015) 69.
- [4] COMPASS, C. Adolph et al.  
'The spin structure function  $g_1$  of the proton and a test of the Bjorken sum rule',  
Phys. Lett. B 753 (2016) 18.
- [5] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Interplay among transversity induced asymmetries in hadron leptonproduction',  
Phys. Lett. B 753 (2016) 406.
- [6] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Longitudinal double spin asymmetries in single hadron quasi-real photoproduction at high  $p_T$ ', Phys. Lett. B 753 (2016) 573.
- [7] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Multiplicities of charged pions and charged hadrons from deep-inelastic scattering of muons off an isoscalar target', Phys. Lett. B 264 (2017) 1.
- [8] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Exclusive  $\omega$  meson production on transversely polarised protons',  
Nucl. Phys. B 915 (2017) 454.
- [9] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Multiplicities of charged kaons from deep-inelastic muon scattering off an isoscalar target', Phys. Lett. B 767 (2017) 133.
- [10] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Final COMPASS results on the deuteron spin structure function  $g_1^d$  and the Bjorken sum rule', Phys. Lett. B 769 (2017) 034.
- [11] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Leading order determination of the gluon polarisation using a novel method',  
Eur. Phys. Journ. C 77 (2017) 209.
- [12] COMPASS, C. Adolph et al.  
'First measurement of the Sivers asymmetry for gluons from SIDIS data',  
Phys. Lett. B 772 (2018) 854.
- [13] COMPASS, M. Aghasyan et al.  
'Transverse-momentum-dependent multiplicities of charged hadrons in muon-deuteron deep inelastic scattering', Phys. Rev. D 97 (2018) 032006.

- [14] COMPASS, M. Aghasyan et al.  
'Longitudinal double-spin asymmetry  $A_1^p$  and spin-dependent structure functions  $g_1^p$  of the proton at small values of  $x$  and  $Q^2$ ', Phys. Lett. B. 781 (2018) 464.
- [15] COMPASS, R. Akhunzyanov et al.  
' $K^-$  over  $K^+$  multiplicity ratio for kaons produced on DIS with a large fraction of the virtual-photon energy', Phys. Lett. B 786 (2018) 390.
- [16] COMPASS, R. Akhunzyanov et al.  
'Light isovector resonances in  $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ p$  at 190 GeV/c', Phys. Rev. D 98 (2018) 092003.

**Beteiligung an weiteren Publikationen:**

- [17] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Resonance production and  $\pi\pi$  S-wave in  $\pi^- + P \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ + p_{\text{recoil}}$ ', Phys. Rev. Lett. D 95 (2017) 032004.
- [18] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Sivers asymmetries extracted in SIDIS at the hard scale of the Drell-Yan process at COMPASS', Phys. Lett. B 770 (2017) 034.
- [19] COMPASS, M. Aghasyan et al.  
'First measurement of transverse-spin-dependent azimuthal asymmetries in the Drell-Yan process', Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 112002
- [20] COMPASS, M. Aghasyan et al.  
'New analysis of  $\eta\pi$  tensor resonances measured at the COMPASS experiment'', Phys. Lett. B 779 (2018) 464.
- [21] COMPASS, C. Adolph et al.  
'Azimuthal asymmetries of charged hadrons produced in high-energy muons scattering of longitudinally polarised deuterons', Eur. Phys. Jour. C 78 (2018) 952.
- [22] COMPASS, M. Aghasyan et al.  
'Search for muoproduction of X(3872) at COMPASS and indication of a new state  $\tilde{X}(3872)$ ', Phys. Lett. B783 (2018) 334.

## 8.2 Andere Veröffentlichungen

### Vorträge auf Konferenzen mit Proceedings:

- [23] E. Kabuß, *New results from COMPASS*, European Physics Society Conference of High Energy Physics (EPS-HEP), Wien (2015);
- M. Wilfert, *Results on longitudinal spin physics at COMPASS*, XX Int. QCD Conference (QCD15), Montpellier (2015);
- M. Wilfert, *Results on longitudinal spin physics from COMPASS*, 6th Int. conference of Physics Opportunities at Electron-Ion-Collider (POETIC VI), Palaiseau (2015).
- M. Wilfert, *Final results on the spin dependent structure function  $g_1^d$  from COMPASS*, XXIV. Int. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS16), Hamburg (2016);
- M. Wilfert, *Final COMPASS results on the spin dependent structure functions  $g_1^d$  and  $g_1^p$* , 22nd International Symposium on Spin Physics (SPIN16), Champaign (2016);
- W. Nowak, *Exclusive  $\omega$  meson production at COMPASS*, 14th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (MESON2016) Kracow (2016);
- E. Kabuß, *Progress in spin and 3D nucleon structure*, XXV. Int. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS17), Birmingham (2017).

### Vorträge auf Konferenzen:

- [24] J. Bernhard, *Recent results from the COMPASS experiment*, Europea Nuclear Physics Conference (EUNPC), Groningen (2015);
- E. Kabuß, *Helicity distributions from deep-inelastic scattering*, 4th Workshop on the QCD Structure of the Nucleon (QCD-N-2016), Gexto (2016);
- E. Kabuß, *Hadron multiplicities from COMPASS*, 4th Workshop on the QCD Structure of the Nucleon (QCD-N-2016), Gexto (2016);
- N. Pierre, *Monte-Carlo event generation with radiative QED processes in deep-inelastic scattering*, 12th European Research Conference on Electromagnetic Interactions with Nucleons and Nuclei (EINN2017), Paphos (2017);
- N. Pierre, *Monte-Carlo event generation with radiative QED processes in deep-inelastic scattering*, GDR QDC 2017, Saclay (2017);
- N. Pierre, *Hadron multiplicities and fragmentation in SIDIS*, 13th Conference on the Interactions of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2018), Palm Springs (2018);
- E. Kabuß, *Recent COMPASS on the transverse extensions of partons inside the proton and plans for a new measurement of the proton radius with muons*, 13th Conference on Quark Confinement and the Hadron Spectrum (CONFINEMANT XIII), Maynooth (2018);
- J. Giarra, *COMPASS Trigger for DVCS data taking (2016/17)*, Gordon Research

Conference: Photonuclear Reactions: From Quarks to Nuclei, Holderness (2018).

**Vorträge DPG-Tagungen:**

- [25] DPG-Frühjahrstagung (Physik der Hadronen und Kerne), Darmstadt, März 2016:  
J. Giarra, *Bestimmung von Hadronmultiplizitäten am COMPASS Experiment*,  
N. du Fresne, *Measurements of Charged Kaon Multiplicities at COMPASS*,  
M. Wilfert, *First results on the longitudinal double spin asymmetry for identified hadrons from the 2011 COMPASS data*.
- [26] DPG-Frühjahrstagung (Physik der Hadronen und Kerne), Münster, März 2017:  
J. Giarra, *Analysis of 2016 COMPASS data on DVCS*,  
N. Pierre, *Monte Carlo event generation with radiative QED processes in deep-inelastic scattering*.  
B. Veit, *Performance of the COMPASS trigger*.
- [27] DPG-Frühjahrstagung (Physik der Hadronen und Kerne), Bochum, Februar 2018:  
J. Giarra, *Analysis of COMPASS data on DVCS*,  
N. Pierre, *Monte Carlo event generation with radiative QED processes in deep-inelastic scattering*.  
B. Veit, *The COMPASS trigger for Drell-Yan measurements 2018*.

**COMPASS internal notes:**

- [28] M. Wilfert, *Estimate of systematic uncertainties for the 2007  $A_1^p$  data in  $x$ - $Q^2$  bins*, 2015-3.
- [29] N. du Fresne von Hohenesche, B. Veit, *Trigger modifications for Drell-Yan*, 2015-4.
- [30] M. Wilfert, *Estimation of the bias due to semi-inclusive triggers for  $A_1^p(2011)$  and POL-DIS*, 2015-5.
- [31] J. Barth, J. Bernhard, E. Kabuß, N. du Fresne, B. Veit, *Trigger configuration summary 2002 – 2012*, 2016-4.
- [32] N. Pierre, B. Badelek, *Comparison of radiative process calculations in TERAD and DJANGO*. 2017-3.
- [33] M. Wilfert, J. Giarra, *RICH performance in 2011/12*, 2017-6.
- [34] B. Veit, J. Barth, *Trigger related issues for the DVCS runs 2016/2017*, 2018-2.
- [35] N. Pierre, *DJANGO: a Monte-Carlo generator with radiative corrections*, 2018-4.

### **8.3 Abschlußarbeiten**

#### **Masterarbeiten:**

- [36] Alexander Becker,  
'Untersuchungen zum Myon-Triggersystem der COMPASS Drell-Yan-Messungen', Juni 2016.
- [37] Johannes Giarra,  
'Bestimmung von Hadronmultiplizitäten in Lepton-Nukloen-Streuung bei COMPASS', Juni 2016.
- [38] Benjamin Veit,  
'Qualitätsanalyse des COMPASS-Triggers', September 2017.

#### **Doktorarbeiten:**

- [39] Nicolas du Fresne von Hohenesche,  
'Semi-inclusive muon-proton scattering at 160 GeV/c', Mainz 2015.
- [40] Malte Wilfert,  
'Investigation of the spin structure of the nucleon at the COMPASS experiment', März 2017.