

Abbildung 17: Eine Hälfte des ZEUS-Mikro-Vertex-Detektors. Im Vordergrund sind vier Lagen von Vorwärtsmodulen mit Frontend-Hybriden, im Hintergrund die Barrelmodule.

ZEUS-Experiment

Beteiligte Institute: Univ. und INFN Torino Alessandria, Inst. Phys. Technol. Almaty, NIKHEF und Univ. Amsterdam, ANL Argonne, Andrews Univ. Berrien Springs, Univ. und INFN Bologna, Univ. Bonn, Univ. Bristol, RAL Chilton, Ohio State Univ. Columbus, Univ. della Calabrie und INFN Cosenza, Acad. of Mining and Metallurgy, Inst. of Nucl. Physics und Jagellonian Univ. Cracow, Univ. und INFN Firenze, INFN Frascati, Univ. Freiburg, Univ. Glasgow, DESY und Univ. Hamburg, Univ. of Iowa Iowa City, Columbia Univ. Irvington, FZJ Jülich, Chonnam Nat. Univ. Kwangju, Imperial Coll. und Univ. Coll. London, Univ. of Wisconsin Madison, Univ. Autonoma Madrid, McGill Univ. Montreal, Engin. Phys. Inst. und State Univ. Moscow, Yale Univ. New Haven, York Univ. North York, Oxford Univ., Univ. und INFN Padova, Weizmann Inst. Rehovot, Univ. La Sapienza und INFN Roma, Polytech. Univ. Sagamihara, Univ. of California Santa Cruz, Korea Univ. Seoul, Univ.-GH Siegen, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. Toronto, Inst. of Part. and Nucl. Stud. KEK Tsukuba, Pennsylvania State Univ. University Park, Inst. of Nucl. Stud. und Univ. Warsaw, Meiji Gakuin Univ. Yokohama, DESY Zeuthen.

Sprecher: B. Foster, Univ. of Bristol

Die Datennahme der HERA-Detektoren begann im Jahr 2000 nach einer etwas verlängerten Weihnachtsunterbrechung am 18. Januar und endete am 24. August, dem Beginn der Umbauphase für die HERA-Luminositätssteigerung. Der HERA-Betrieb begann mit 920 GeV Protonen und 27.5 GeV Positronen. Nach einem sehr erfolgreichen Start von HERA und ZEUS und der sich abzeichnenden Möglichkeit, eine Rekordluminosität mit Positronen zu liefern, wurde im April von HERA und den Experimenten beschlossen, entgegen den ursprünglichen Plänen bis zum Ende der Datennahmeperiode in 2000 den Betrieb mit Positronen fortzusetzen und nicht auf Elektronen umzuschalten. HERA lief das ganze Jahr sehr konstant und mit hoher Luminosität. So wurde diese Datennahmeperiode mit einer zur Physik-Analyse nutzbaren, integrierten Luminosität von 48 pb^{-1} zum bisher erfolgreichsten Jahr für ZEUS. Insgesamt hat ZEUS jetzt vor dem Umbau zur Luminositätssteigerung integrierte Luminositäten von 116 pb^{-1} für Positronen und 17.5 pb^{-1} für Elektronen zur Physik-Analyse zur Verfügung.

Darüber hinaus wurde im Berichtszeitraum weiter intensiv am Bau der neuen Detektorkomponenten

gearbeitet, dem Mikro-Vertex-Detektor (MVD) (Abb. 17), dem „Straw Tube Tracker“ (STT) und einem neuen Luminositäts-Monitoringsystem, die alle während des Umbaus zur HERA-Luminositätssteigerung eingebaut werden.

Die ZEUS-Kollaboration hat in diesem Jahr neun Veröffentlichungen verfasst. Einige der Physik-Resultate werden kurz vorgestellt.

Datennahme

Das dreistufige ZEUS Triggersystem hatte keine Probleme mit der hohen Luminosität. Bei HERA-Designluminosität von $1.6 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ betrug die Totzeit etwa 2% bei Datenraten von typischerweise 300 Hz in der ersten Stufe und 15 Hz am Ausgang der dritten Stufe.

Das zentrale Datenerfassungs- und Überwachungssystem wurde weiter modernisiert und im Hinblick auf Stabilität und Wartbarkeit verbessert. Hierzu gehörte der Einsatz von objekt-orientierten Methoden und modernen Programmiersprachen bei der Weiterentwicklung bestehender Systeme. Die vermehrte Nutzung von

WWW-Browsern oder WAP-Handies erleichtert die Beobachtung des Experimentbetriebs und die Fehlerdiagnose von den beteiligten Instituten aus. Durch die verbesserten Überwachungsmöglichkeiten konnte die Schichtbesetzung von drei auf zwei Personen reduziert werden.

Für das ZEUS Protonenspektrometer (LPS) war die vergangene Datennahmeperiode die letzte, da sein Platz nach dem HERA-Umbau von Strahlführungsmagneten eingenommen wird. Es wurde deshalb besondere Mühe darauf verwendet, den Untergrund von HERA so zu optimieren, dass die empfindlichen Spektrometertektoren möglichst häufig an den Strahl gefahren werden konnten. Dadurch ist es gelungen, bei über 70% der von ZEUS aufgezeichneten Luminosität das Spektrometer zu betreiben.

Einige Zeit nach Beginn der Datennahme häuften sich Hochspannungsabschaltungen in der zentralen Driftkammer (CTD) wegen zu hoher Ströme in den äußeren Lagen, die nicht durch Untergrund vom Strahl hervorgerufen wurden. Daraufhin wurde im Juni die Gasmischung leicht geändert und etwas Wasserdampf hinzugefügt. Seither arbeitete die CTD störungsfrei.

Im Offline-Bereich wurde trotz der Rekordluminosität HERAs eine zeitnahe Rekonstruktion der gerade aufgezeichneten Daten erreicht, wobei bis zu 450 000 Ereignisse pro Tag prozessiert wurden. Zur Analyse der Daten wurde das bestehende ZARAH-System durch eine PC-Farm ergänzt, womit man eine Verdopplung der verfügbaren Rechenkapazität erreichte. Die Plattenkapazität zur Speicherung der Ereignisdaten wurde von 3 auf 6 TB erweitert. Für das ZEUS Computing der Jahre 2001–2005 wurden Konzepte und Planungsmodelle entwickelt, die den Herausforderungen durch die HERA-Luminositätserhöhung und die neuen ZEUS-Detektorkomponenten Rechnung tragen.

ZEUS Umbau

Die Luminositätserhöhung von HERA erfordert den Einbau neuer Quadrupolbrücken und supraleitender Magnete (GO und GG) innerhalb des ZEUS-Detektors. Um Platz zu schaffen, wurden das rückwärtige Strahlrohrkalorimeter (BPC) sowie das Vorwärts-Plug-Kalorimeter (FPC) endgültig entfernt. Die neuen

Quadrupolbrücken wurden im Dezember eingebaut. Das Aufstellungssystem der Magnete auf den Quadrupolbrücken wurde entwickelt und installiert. Die dem Wechselwirkungspunkt zugewandten Enden der Magnete werden an den ZEUS Speicherplatten aufgehängt. Die Aufhängung ist mit einer Steuerung versehen, die es während des Luminositätsbetriebes erlaubt, die Magnete innerhalb von etwa 0.3 mm zu verschieben. Die Steuerung dazu wird in Zusammenarbeit mit der Gruppe MDI entwickelt und gebaut.

Um ZEUS an die neuen Maschinenkomponenten anschließen zu können, musste das ZEUS-Unterjoch um 10 mm zur Ringaußenseite verschoben werden.

Neben den Vorbereitungen für die Luminositätserhöhung fanden Reparaturen am Kalorimeter, dem Vorwärtsdetektor, den Vorwärts- und Barrel-Myonkammern, dem Backing Kalorimeter und dem Hadron-Elektron Separator statt.

In Verbindung mit der Erhöhung der Luminosität von HERA sind mehrere Verbesserungen des ZEUS-Detektors geplant. Es sind dies der Bau eines Mikro-Vertex-Detektors (MVD) aus Siliziumstreifen-zählern und gleichzeitig eines neuen Stahlrohres, das Ersetzen der Übergangsstrahlungskammern im Vorwärtsspurendetektor durch Straw Tubes sowie der Neubau und die Erweiterung des Luminositäts-Messsystems. Diese neuen Detektorkomponenten werden im Frühjahr 2001 eingebaut.

Neue Detektorkomponenten

Mikro-Vertex-Detektor

Nach dem Umbau zur HERA-Luminositätserhöhung wird ZEUS ein Mikro-Vertex-Detektor (MVD) für die allgemeine Verbesserung der Spurvermessung und im Besonderen zur Erkennung von Sekundärvertices zur Verfügung stehen. Der Detektor besteht aus 712 Siliziumdioden mit zusammen etwa 210 000 Auslesekanälen. Abbildung 17 zeigt eine Hälfte des Mikro-Vertex-Detektors mit den Vorwärtsmodulen im Vordergrund.

Das Jahr 2000 stand für den MVD im Zeichen der vollen Produktionsrate für alle Komponenten bei allen

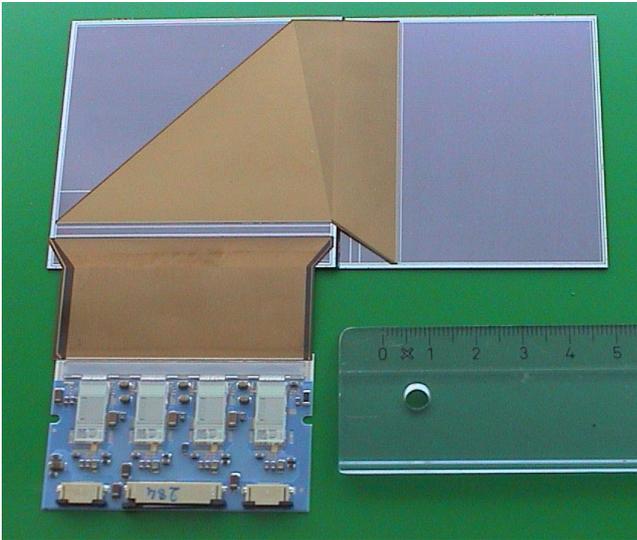


Abbildung 18: Ein Halbmodul des Barrels des Mikro-Vertex-Detektors, bestehend aus zwei Dioden, Kaptonfolien und Hybrid.

beteiligten Instituten. NIKHEF ist verantwortlich für die Präzisionsmechanik, den Bau der Leitern, den Zusammenbau des Gesamtdetektors und für das Kühlsystem, Oxford für die interne Laser-Vermessung und die Kabelverbindungen, UCL für die Kontroll- und Clocksignalverteilung, Padova für die Auslese-Hybride, Torino für die Niedervolt-Spannungsversorgung und KEK für die ADCs.

In Zusammenarbeit mit dem II. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg fand bei DESY in Hamburg und Zeuthen die Produktion der eigentlichen Siliziumdetektormodule statt.

Für den Barrelteil wurden jeweils zwei Dioden zu sogenannten Halbmodulen (Abb. 18) präzise verklebt, für den Vorwärtsteil (Abb. 19) wurden Kunststoffteile zur späteren Befestigung an die Dioden geklebt. Für die elektrischen Verbindungen wurden dünne Kaptonfolien mit aufgalvanisierten Kupferbahnen auf die Dioden geklebt und an die Dioden gebondet. Dabei wurden fast eine Million Bonds in Al-Dünndraht-Technik gesetzt. Darüber hinaus waren DESY und die Universität Bonn für die Beschaffung der Spannungsversorgung für die Verarmungsspannung verantwortlich.

Nachdem im Juli 2000 alle 300 Halbmodule mit Ersatzteilen bei NIKHEF angeliefert worden waren, konnte

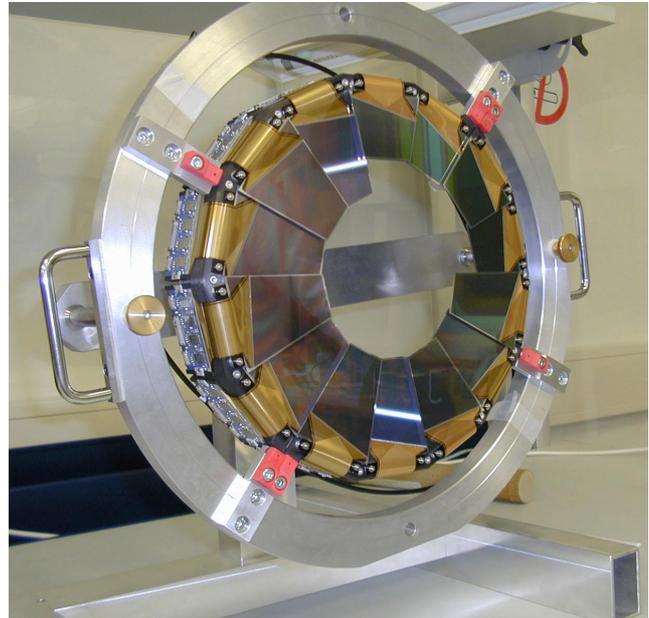


Abbildung 19: Ein Ring mit Vorwärtsmodulen. Um Platz für das elliptische Strahlrohr zu haben, sind einige Module verkürzt.

dort die Produktion aller Leitern, der Haltestruktur für jeweils fünf Module, bis zum September abgeschlossen werden. Danach begann dort die Montage und Vermessung der Leitern im Tragezylinder. Parallel dazu lief in Hamburg die Produktion der Vorwärtsmodule, die nach Montage, Einjustierung und Vermessung auf den Tragerringen mit der Lieferung von vier bestückten Ringen nach NIKHEF im November abgeschlossen wurde. Am 12. Dezember wurde die vollständig bestückte obere Hälfte des MVD in Hamburg angeliefert. Erste Tests zeigten, dass alle Module den Transport gut überstanden hatten und voll funktionsfähig waren. Mit der internen Laser-Vermessung wurde verifiziert, dass auch die Mechanik sich nicht verändert hatte.

Das System und die Software zur Datenauslese, Steuerung und Überwachung des Detektors sind vorhanden und werden zur Zeit intensiv erprobt und optimiert. Die Rechner zur Realisierung des Spurtriggers wurden von der Yale University bereitgestellt. Sie sind bei DESY eingetroffen und werden zur Zeit konfiguriert. Die Entwicklung der Software ist weit fortgeschritten.

An der zur Datenauswertung benötigten Software wird intensiv gearbeitet. Es wurden große Fortschritte bei

der Entwicklung der Programme zur Spurerkennung und zum Spurfit gemacht, mit dem Ziel, am Ende einen gemeinsamen Spurfit aller inneren Spurdetektoren zur Verfügung zu haben. Darüber hinaus wurde eine auf GEANT beruhende Simulation des Detektors entwickelt.

Seit September wurde in der JADE-Halle ein Testgebiet vorbereitet, in dem der MVD in seiner endgültigen Form aufgebaut und erste Erfahrungen mit dem Gesamtsystem gesammelt werden sollen. Fast alle Komponenten der Ausleseelektronik sind bis zum Jahresende geliefert worden. Seit November stand auch das Wasserkühlungssystem für die Auslese-Hybride zur Verfügung. Damit konnten zum ersten Mal größere Teile der Auslese gleichzeitig betrieben werden.

Mitte Februar 2001 wird die untere Hälfte des MVD fertig sein, zusammen mit den noch fehlenden Kontrolleinheiten. Damit kann ab Ende Februar mit dem Aus-testen des vollständigen MVD begonnen werden. Der Einbau in ZEUS ist für die zweite Märzhälfte vorgesehen.

Im Laufe des Berichtsjahres wurden weiterhin im Teststrahl Messungen an Prototyp-Modulen durchgeführt. Dabei stand neben der Erprobung der technischen Lösungen ein stabiler Rekonstruktions-Algorithmus im Vordergrund. Es hatte sich gezeigt, dass mit den üblichen Rekonstruktionsverfahren die Auflösung vom Auftreffort des Teilchens auf dem Siliziumdetektor abhängt. Der Hauptgrund für diese Ortsabhängigkeit der Auflösung sind die Extra-Kapazitäten der Bondpads auf den Detektoren. Diese Ergebnisse werden in der Entwicklung der Analysesoftware berücksichtigt.

Straw Tube Tracker

Der ZEUS „Straw Tube Tracker“ (STT) wird gebaut, um die Spurrekonstruktion geladener Teilchen in Vorwärtsrichtung (Protonrichtung) zu verbessern. Er wird im Shutdown 2000/2001 im Rahmen des Umbaus von ZEUS für die HERA-Luminositätserhöhung eingebaut.

Eine Straw Tube (Strohalm) besteht aus einem Rohr aus dünner Kaptonfolie (120 μm Wandstärke und 7.47 mm Durchmesser) mit einem Draht in der Mitte, an

den Hochspannung angelegt wird. Dieses Detektorkonzept wurde von MEPHI in Moskau für LHC entwickelt und zeichnet sich durch gute Ortsauflösung und geringe Hit-Multiplizität selbst bei hohem Untergrund aus.

Um Platz für den neuen Detektor zu schaffen, wird der zur Zeit im Vorwärtsdetektor eingebaute Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) entfernt. In zwei Schlitze von 20.8 cm Breite entlang des Strahls werden 48 Sektoren in zwei unterschiedlichen Größen eingesetzt. Jeder Sektor besteht aus 194 bzw. 266 Straw Tubes von 20 cm bis 102 cm Länge, die in drei Lagen angeordnet sind. Der Bau des Detektors wurde im Juli 1998 genehmigt. Nachdem ein Prototyp gebaut und erfolgreich getestet worden war, wurden die Röhren hergestellt und zu Sektoren zusammengeklebt. Ende 1999 wurde mit dem Einbau der Signaldrähte in Moskau (MEPHI), Toronto (York University), Freiburg (Universität Freiburg) und Hamburg (DESY, Universitäten Bonn und Hamburg) begonnen. Die Universität Siegen hat die Hochspannungsverteilungen gebaut.

Im Jahr 2000 wurden alle 50 Sektoren verdrahtet, mit Hochspannungs- und Gasanschlüssen versehen und mit einer ^{55}Fe -Quelle getestet. Danach wurden die Sektoren zur Erhöhung der mechanischen Stabilität in dünne Kästen aus Kohlefaser geklebt. Während der Produktion stellten sich die Gewährleistung der Gasdichtigkeit der Sektoren sowie die Montage der übrigen Anbauteile als langwieriger heraus als geplant. Die Montage der Signaldrähte dagegen erwies sich als schneller und einfacher als gedacht.

Alle Sektoren sind mittlerweile fertig gebaut und bei DESY eingetroffen. Bei DESY werden die Sektoren zunächst in 17 μm dicke Kupferfolie eingepackt, um sie von Störsignalen abzuschirmen. Die Frontend-Ausleseelektronik wird dann direkt an die Sektoren montiert. Sie besteht aus zwei Boards. Das Multiplex-Board befindet sich unmittelbar am Ende der Straw Tubes, das Treiber-Board am Rand des Detektors. Abbildung 20 zeigt einen vollständigen STT Sektor mit montierter Frontend-Elektronik.

Die Elektronik ist so ausgelegt, dass mit ihr die 11 000 Straw Tubes des Detektors mit den 2000 Kanälen des Analog-Digital-Wandler-Systems des ursprünglichen TRD ausgelesen werden können. Das Design der Elektronik wurde im Berichtsjahr fertiggestellt und ausführlich getestet. Dazu wurde die Elektronik auch auf ei-

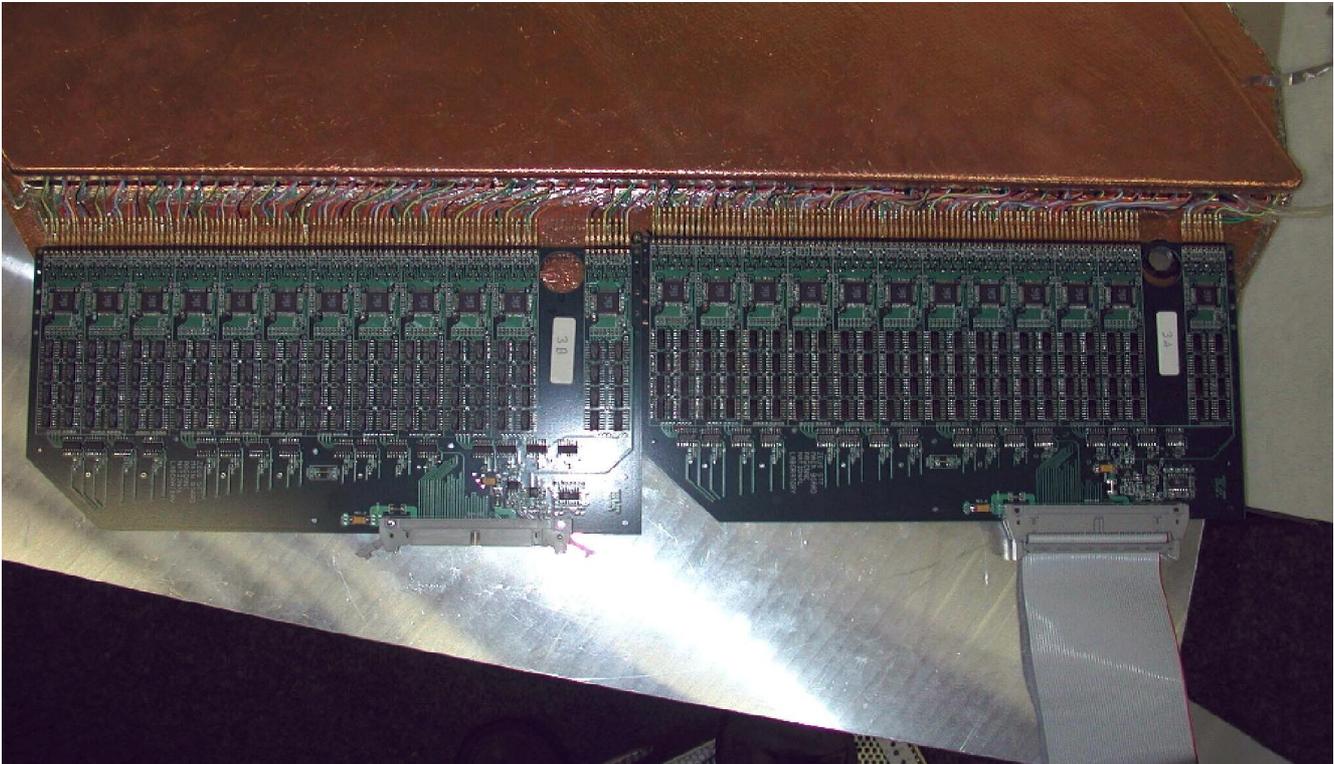


Abbildung 20: Ein STT Sektor mit montierter Frontend-Elektronik.

nem Prototyp-Sektor montiert und im DESY-Teststrahl getestet. Die Produktion aller Komponenten ist mittlerweile beendet und die Lieferung der letzten Boards ist für Ende Februar vorgesehen. Am Entwurf und Bau der Elektronik waren das Argonne National Laboratory, die Tel Aviv University und die Universität Siegen beteiligt.

Das Gestell zur Montage der Sektoren im Vorwärtsdetektor wurde in den Universitäten Bonn und Freiburg konstruiert und gebaut. Im Oktober 2000 wurde der Vorwärtsdetektor aus ZEUS ausgebaut, der TRD entfernt und der restliche Vorwärtsdetektor für den Einbau des STT vorbereitet.

Große Fortschritte wurden bei den Programmen zur Rekonstruktion der Hits und der Spurfindung gemacht. Auch die Monte Carlo-Simulation wurde verbessert. Für die kommende Datennahmeperiode wird ZEUS mit dem STT einen Detektor haben, der zuverlässig Punkte zur Spurrekonstruktion im Vorwärtsbereich liefert, die mit den gemessenen Koordinaten der anderen Spurdetektoren kombiniert werden können.

Luminositätsmonitor

Zur Messung der HERA-Luminosität wird der Bethe-Heitler Prozess $e p \rightarrow e p \gamma$ verwendet. Die erzeugten Photonen werden mit einem elektromagnetischen Kalorimeter nachgewiesen, das sich im HERA-Tunnel in 107 m Abstand von der ZEUS Wechselwirkungszone befindet. Bisher wurde eine Genauigkeit der Luminositätsmessung von etwa 1.5% erreicht. Die gleiche Präzision wird auch nach der Luminositätserhöhung verlangt.

Die Luminositätsmessung wird nach der HERA-Luminositätserhöhung aus mehreren Gründen wesentlich erschwert. Die stärkere Ablenkung des Elektronenstrahls in der Wechselwirkungszone führt zu einer Erhöhung der charakteristischen Energie der Synchrotronstrahlung und zu einer Erhöhung der Anzahl der Synchrotronstrahlungs-Photonen um einen Faktor sieben. Gleichzeitig wird sich die Anzahl von Bremsstrahlungs-Photonen (Bethe-Heitler Prozess) um das Fünffache erhöhen. Die erhöhte Photonrate erhöht

die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Kollision der Elektronen- und Protonenstrahlen mehrere Photonen abgestrahlt werden und gleichzeitig im Photonkalorimeter nachgewiesen werden und so zu einer Verfälschung der Luminositätsmessung führen. Ohne eine Abschirmung von mehreren Strahlungslängen Dicke würde das jetzige Photonkalorimeter innerhalb kurzer Zeit durch Strahlung beschädigt werden. Eine dickere Abschirmung verschlechtert aber die Energieauflösung des Kalorimeters und macht eine präzise Luminositätsmessung unmöglich.

Der neue Luminositätsmonitor muss auch unter den erschwerten Bedingungen eine präzise Messung der Luminosität ermöglichen. Außerdem ist es sinnvoll, zwei voneinander unabhängige Messmethoden mit unterschiedlichen systematischen Fehlern zu verwenden.

Das bisherige Photonkalorimeter wird durch ein neues Kalorimeter (Szintillator-Blei Sandwich) mit strahlungshartem Szintillator ersetzt. Zur Reduzierung des Synchrotronstrahlungsuntergrundes befindet sich unmittelbar vor dem Kalorimeter ein so genannter aktiver Filter aus Kohlenstoff mit vier Strahlungslängen Dicke. Der Filter ist in zwei Teile unterteilt, hinter denen sich jeweils ein Cherenkov Detektor aus Aerogel befindet. Die niederenergetischen Photonen der Synchrotronstrahlung werden in den Cherenkov Detektoren nicht nachgewiesen. Der erste Teil des elektromagnetischen Schauers der hochenergetischen Bethe-Heitler Photonen wird dagegen im Filter gemessen und zur Korrektur der Energiemessung im Kalorimeter verwendet.

Das neue Kalorimeter und die beiden Cherenkov Detektoren sind inzwischen gefertigt und im DESY-Teststrahl untersucht worden. Die Ergebnisse der Teststrahlmessungen zeigen, in sehr guter Übereinstimmung mit Monte Carlo Studien, dass die Energieauflösung des Photonkalorimeters mit aktivem Filter entscheidend verbessert wird.

Eine zweite, unabhängige Luminositätsmessung wird mit einem Elektron-Positron Paarspektrometer durchgeführt. Als Konversionstarget der Bethe-Heitler Photonen dient das Austrittsfenster in 92 m Abstand vom Wechselwirkungspunkt. Die erzeugten Elektron-Positronpaare werden durch einen Dipolmagneten abgelenkt und mit zwei kleinen Kalorimetern, die unmittelbar vor dem Photonkalorimeter angeordnet sind, gemessen. Als Detektoren werden die beiden Module

des bisherigen Strahlrohr-Kalorimeters mit geringen Modifikationen wieder verwendet. Der Vorteil dieser Messmethode besteht in einer entsprechend geringeren Anzahl von Photonen im Spektrometerdetektor aufgrund der geringen Konversionswahrscheinlichkeit, das heißt es gibt keine Mehrfachphotonen, Synchrotronstrahlungsuntergrund und Strahlungsschäden.

Zur Bestimmung der Akzeptanz und der Eichung des Photonkalorimeters und des Spektrometers wird ein kleines elektromagnetisches Kalorimeter verwendet, der sogenannte „6-m-Tagger“, mit dem das gestreute Elektron in Koinzidenz mit dem Photon gemessen wer-

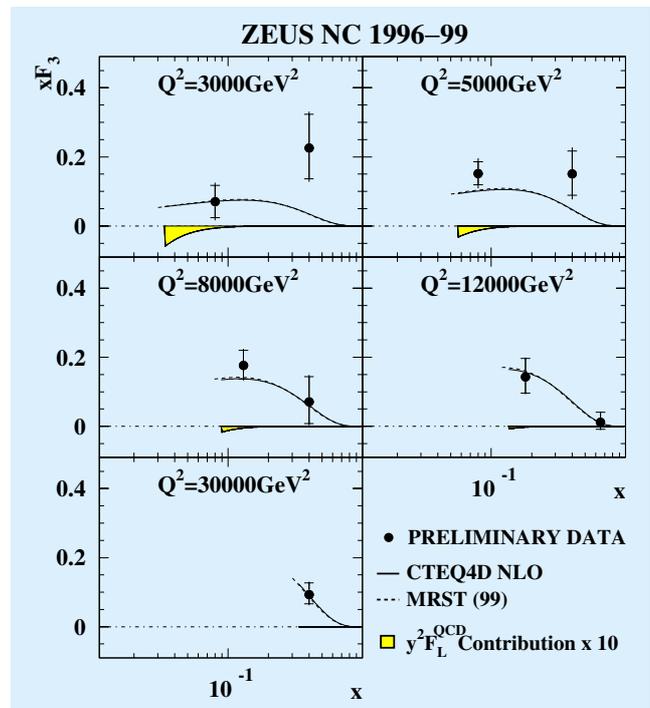


Abbildung 21: Die Messung der Proton-Strukturfunktion $x F_3$, die aus dem Vergleich vom $e^+ p$ -Streuquerschnitt mit dem $e^- p$ -Streuquerschnitt bestimmt wurde. Die Abhängigkeit von der Bjorken-x-Variablen bei festen Q^2 -Werten zwischen $3 \times 10^3 \text{ GeV}^2$ und $3 \times 10^4 \text{ GeV}^2$ wird gezeigt. Eine gute Übereinstimmung mit NLO-QCD-Berechnungen („Next to Leading Order“), die die CTEQ4D-Partondichtefunktionen verwendet haben, wird beobachtet. Die gelben Regionen zeigen den Beitrag von der in der Quantenchromodynamik berechneten longitudinalen Strukturfunktion F_L , skaliert um einen Faktor 10.

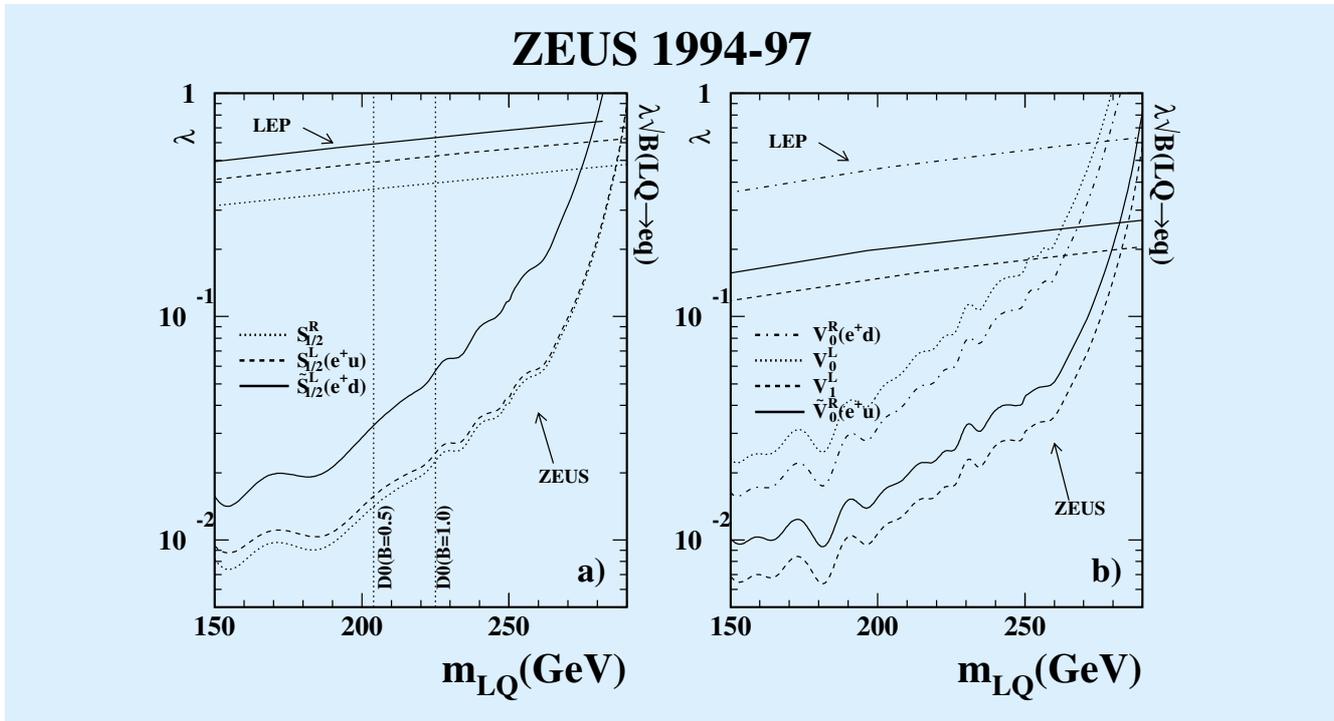


Abbildung 22: Empfindlichkeitsgrenzen auf die Leptoquark-Kopplungsstärke für LQ mit a) Spin 0 und b) Spin 1, als Funktion der angenommenen LQ-Masse. Die ausgeschlossenen Bereiche liegen oberhalb der LEP- und ZEUS-Kurven und links von den Tevatron-Grenzen (D0), die von der Annahme über das $LQ \rightarrow eq$ Verzweigungsverhältnis B direkt abhängen.

den kann. Ein Prototyp dieses Taggers ist im DESY-Teststrahl untersucht worden. Der Bau des Taggers ist zur Zeit in Vorbereitung.

Physikalische Ergebnisse

Eine Auswahl von im Zeitraum dieses Jahresberichtes veröffentlichten physikalischen Ergebnissen wird im Folgenden vorgestellt.

Messung der Proton-Strukturfunktion xF_3

Die im Standard-Modell der Teilchenphysik vorausgesetzte und experimentell beobachtete Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Naturkräfte hat als Folge einen Beitrag zum $e p$ -Wirkungsquerschnitt,

der die Spiegelsymmetrie verletzt. Dieser paritätsverletzende Anteil drückt sich durch die Proton-Strukturfunktion $xF_3(x, Q^2)$ aus, die sowohl durch die Mischung der Amplituden für Photon- und Z-Boson-Austausch als auch durch die Amplitude für Z-Boson-Austausch allein entsteht. Die Daten entsprechend einer integrierten Luminosität von 16 pb^{-1} , die ZEUS 1998–1999 mit Elektronenstrahl aufgezeichnet hat, ermöglichten eine präzise Messung des e^-p -Streuquerschnittes, der mit einer Messung des e^+p -Streuquerschnittes verglichen wurde, um aus der Differenz den paritätsverletzenden Anteil zur Proton-Strukturfunktion zu ermitteln. Abbildung 21 zeigt das Resultat zusammen mit der Vorhersage des Standard-Modells, bei der aktuelle Parametrisierungen der Partondichtefunktionen zur Berechnung von xF_3 verwendet wurden. Die beobachtete Übereinstimmung liefert einen weiteren überzeugenden Beleg für das Standard-Modell im kinematischen Bereich der elektroschwachen Vereinigung.

Suche nach einer Resonanz in den Endzuständen e^+ +Jet und $\bar{\nu}$ +Jet

Die Suche nach Phänomenen jenseits des Standard-Modells ist ein wesentlicher Bestandteil des Physikprogramms bei HERA, da die hohe Energie der Strahlen einen Blick in bisher unerforschte kinematische Bereiche erlaubt.

Als einziger Speicherring mit hochenergetischen Lepton- und Hadronstrahlen ist HERA das am besten geeignete Labor, nach den postulierten Leptoquarks zu suchen. Diese stellen Zustände dar, die aus den fundamentalen Quark- und Lepton-Feldern bestehen, und deshalb bei HERA durch Quark-Lepton-Fusion direkt produziert werden können. Die ZEUS-Kollaboration hat nach solchen Leptoquark-Zuständen gesucht, wobei die Ereignis Selektion durch die typischen Zerfalls-signaturen bestimmt wurde. Leptoquarks, die in e^+p -Wechselwirkungen erzeugt werden, können entweder in e^+q oder in $\bar{\nu}q$ zerfallen, wobei das Quark als Hadron-Jet im Detektor erscheint. Die Herausforderungen an Detektorleistung und Analysealgorithmen sind in den beiden Fällen sehr unterschiedlich. Im ersten Fall ist ein hochenergetisches Positron mit hohem Transversalimpuls für den Zerfall kennzeichnend. Im anderen Fall werden die Ereignisse durch die anscheinend fehlende Energie-Impuls-Erhaltung erkannt, die durch das nicht nachweisbare Antineutrino zustande kommt.

Abbildung 22 vergleicht die Empfindlichkeit der ZEUS-Messung für den e^+ +Jet-Zustand mit Ergebnissen aus e^+e^- -Wechselwirkungen bei LEP und $p\bar{p}$ -Kollisionen vom Tevatron für Skalar- und Vektor-Leptoquarks. Maß für diese Sensitivität ist die kleinste Kopplungsstärke λ , die noch zu einem signifikanten Signal führt. Am Tevatron, an dem Leptoquarks nur durch Paarproduktion erzeugt werden können, besteht keine Empfindlichkeit auf diese Kopplungsstärke, aber die Aussagekraft wird vom unbekanntem Verzweungsverhältnis $LQ \rightarrow e q$ wesentlich beeinflusst. Auch in dem für das Tevatron günstigsten Fall, in dem die Leptoquarks zu 100% in $e q$ zerfallen, sind die ZEUS-Grenzen oberhalb einer Leptoquark-Masse von 225 GeV empfindlicher.

Im Vergleich zu den LEP-Ergebnissen zeigt die ZEUS-Analyse eine höhere Empfindlichkeit bis etwa 280 GeV, wo die Begrenzung durch die $e p$ -Schwerpunktsenergie einsetzt.

Messung azimuthaler Asymmetrien in tiefunelastischer Streuung

Dieselbe hohe statistische Genauigkeit, die die HERA-Experimente H1 und ZEUS in der Messung der Proton-Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ erreicht haben, schlägt sich auch in der Präzision, mit der die Eigenschaften des hadronischen Endzustands in der tiefunelastischen Streuung studiert werden können, nieder. So konnten das Moment $\langle \cos \phi \rangle$ und zum ersten Mal das Moment $\langle \cos 2\phi \rangle$, bei dem ϕ der Winkel zwischen der Elektronstrebene und der Produktionsebene für Hadronen im hadronischen Schwerpunktsystem ist, präzise gemessen werden. Abbildung 23 zeigt Beispiele der Winkelverteilungen, aus denen die Asymmetrien ermittelt wurden. Das Moment $\langle \cos 2\phi \rangle$ ist besonders interessant, weil die

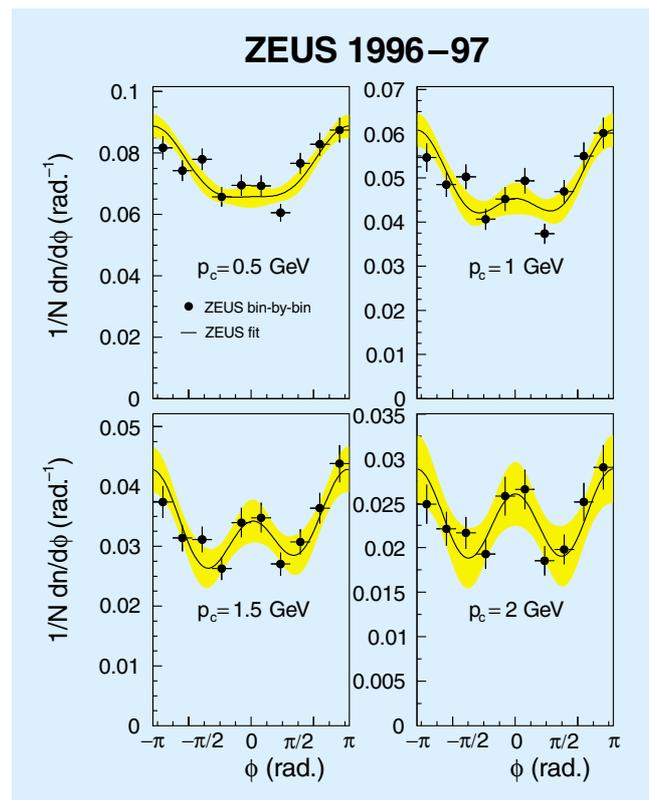


Abbildung 23: Verteilungen des azimuthalen Winkels ϕ im hadronischen Schwerpunktsystem zwischen der Elektronstrebene und der Produktionsebene von Hadronen in der tiefunelastischen Streuung. Die Verteilungen sind über den Transversalimpuls der Hadronen ab dem Mindestwert p_c integriert.

ZEUS 1995

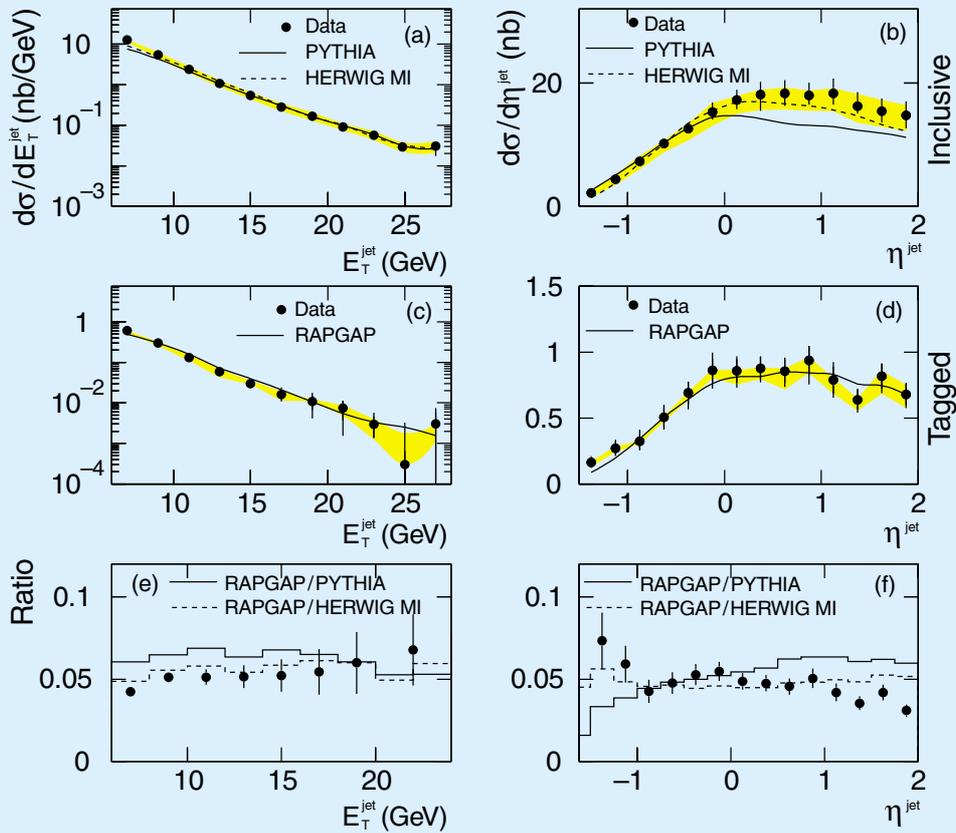


Abbildung 24: Die differentiellen Wirkungsquerschnitte in E_T^{jet} und η^{jet} für inklusive Photoproduktionsprozesse (a) (b) und für Prozesse, in denen ein Neutron n in Vorwärtsrichtung nachgewiesen wurde (c) (d), zusammen mit den daraus ermittelten Verhältnissen (e) (f). Der kinematische Bereich dieser Messungen ist durch $E_T^{\text{jet}} > 6 \text{ GeV}$, $|\eta^{\text{jet}}| < 2$, $Q^2 < 4 \text{ GeV}^2$, $0.2 < y < 0.8$, $E_n > 400 \text{ GeV}$ und $\theta_n < 0.8 \text{ mrad}$ gegeben. Die schattierten Bereiche zeigen die systematische Unsicherheit, die durch die Ungewissheit in der Energieskala des zentralen Kalorimeters zustande kommt. Das hier verwendete Simulationsprogramm RAPGAP beinhaltet ein Pion-Austauschmodell, das auf Faktorisierung des Pionflusses und dessen Partondichten basiert.

störungstheoretisch berechenbaren Beiträge dominieren. Die ZEUS-Messungen zeigen, dass dieses Moment mit dem Transversalimpuls des erzeugten Hadrons ansteigt, wie es von störungstheoretischen Rechnungen der Quantenchromodynamik vorhergesagt wird. Damit wurde gezeigt, dass die beobachteten azimuthalen Asymmetrien einen mit perturbativer Quantenchromodynamik beschreibbaren Anteil haben.

Photoproduktion von Dijets mit einem Neutron in Vorwärtsrichtung

Die bei HERA gewonnenen Messergebnisse haben sich von Anfang an als besonders zum Studium von Phänomenen der diffraktiven Physik geeignet erwiesen. Das Vorwärts-Neutronkalorimeter bei ZEUS hat Untersu-

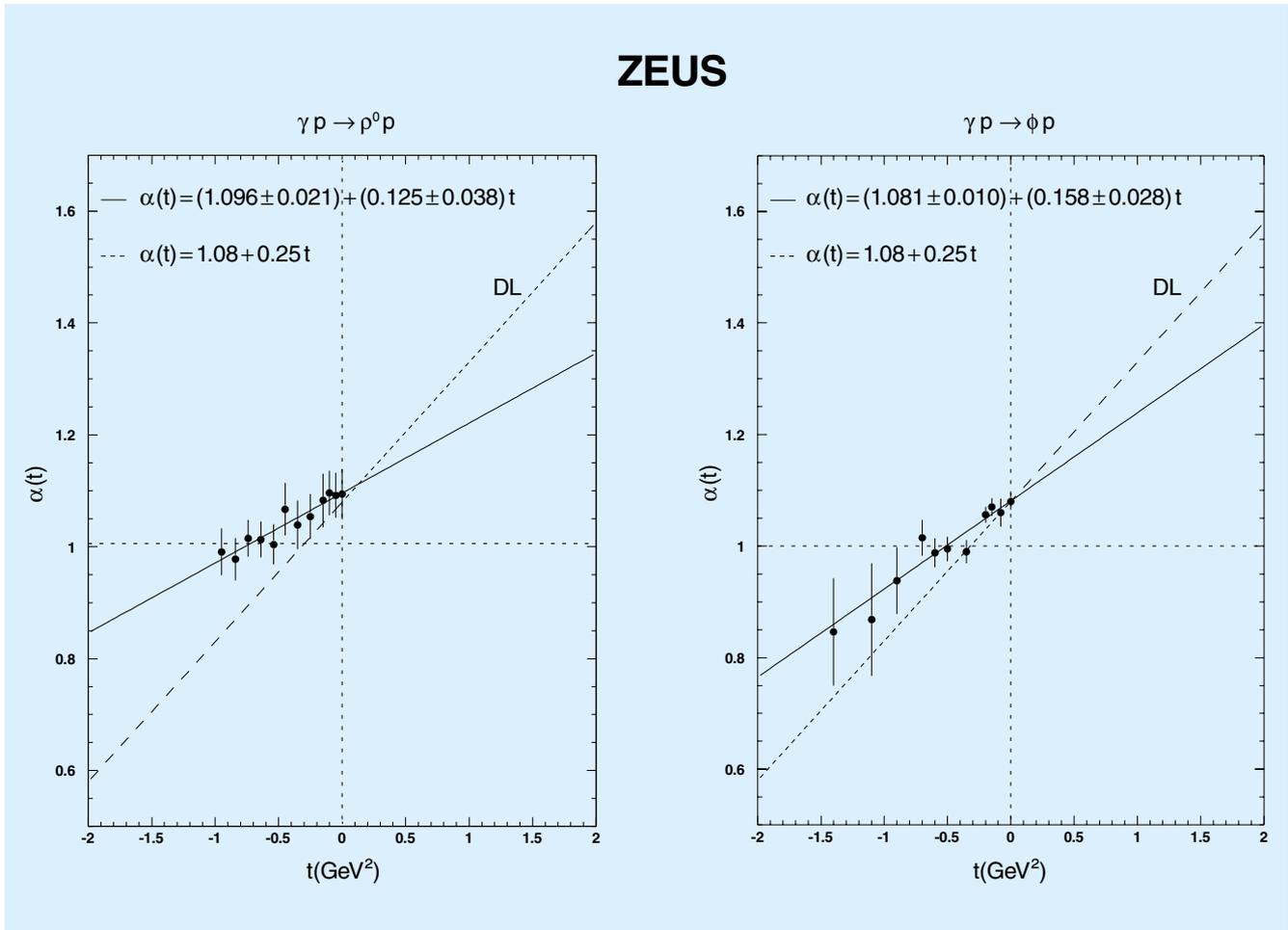


Abbildung 25: Messung der Pomeron-Trajektorie aus den Reaktionen $\gamma p \rightarrow \rho^0 p$ und $\gamma p \rightarrow \phi p$. Die Gerade zeigt das Ergebnis eines linearen Fits. Zum Vergleich zeigt die gestrichelte Linie die Pomeron-Trajektorie, die in der Hadron-Hadron-Streuung gemessen wurde.

chungen von Ladungsaustauschprozessen ermöglicht, insbesondere solcher, in denen zwei Hadron-Jets bei hohem Transversalimpuls von quasi-reellen Photonen erzeugt werden.

Abbildung 24 vergleicht die differentiellen Wirkungsquerschnitte in E_T^{jet} und η^{jet} für inklusive Photoproduktions-Prozesse mit solchen, in denen ein Neutron in Vorwärtsrichtung beobachtet wird.

Die Ergebnisse dieser Studie weisen darauf hin, dass die Daten mit einer Faktorisierungshypothese über Pion-Austausch konsistent sind.

Photoproduktion von Vektormesonen mit hohem Transversalimpuls

Die ZEUS-Kollaboration führt ein Messprogramm zur Untersuchung der Erzeugungsmechanismen von Vektormesonen durch mit dem Ziel, die Gültigkeit von störungstheoretischen Berechnungen der Quantenchromodynamik für exklusive und semi-exklusive Prozesse zu prüfen. Die für derartige Rechnungen benötigte harte Skala kann entweder durch die Photonvirtualität Q^2 , den an das Proton übertragenen Viererimpuls t oder die Vektormeson-Masse M_V gegeben sein.

Beim ZEUS-Experiment wird ein Kleinwinkel-Elektron-Kalorimeter verwendet, um die Photonvirtualität auf $Q^2 < 0.02 \text{ GeV}^2$ zu begrenzen. Auf diese Weise ist es möglich, den Impulstransfer t und die Masse M_V als harte Skalen zu testen.

In der Impulstransfer-Region $0.5 < |t| < 3 \text{ GeV}^2$ konnten die Mechanismen der elastischen Photoproduktion und der proton-dissoziativen Photoproduktion, bei der die invariante Masse des dissoziierten Protonsystems begrenzt ist auf $M_N < 7 \text{ GeV}$, verglichen und so Informationen über den Formfaktor des Protons erzielt werden. Der differentielle Wirkungsquerschnitt $d\sigma/dt$ für elastische ρ^0 -Erzeugung zeigt in diesem t -Bereich eine deutliche Abweichung von der bei niedrigerem $|t|$ beobachteten exponentiellen Abhängigkeit. Während diese Ergebnisse keine eindeutige Gültigkeit des Impulstransfers t als störungstheoretisch relevante Skala zeigen, konnte die relevante Pomeron-Trajektorie $\alpha_{\mathbb{P}}(t)$ aus der Energieabhängigkeit des elastischen Produktionsquerschnittes als Funktion von t gemessen werden. Die in Abbildung 25 dargestellten Ergebnisse aus den ρ^0 - und ϕ -Daten weisen auf eine deutlich schwächere t -Abhängigkeit der Trajektorie hin als jene, die in der Hadron-Hadron-Streuung gemessen wurde.

Messung von exklusiver Elektroproduktion des ω -Mesons

Einen weiteren Beitrag zum Messprogramm der Vektormeson-Erzeugung leistete die Studie zur Elektroproduktion von ω -Mesonen. Diese erste Untersuchung bei hoher γ^*p -Schwerpunktsenergie setzte Identifikationsalgorithmen von π^0 -Mesonen im Urkalorimeter voraus. Im $\pi^+\pi^-\pi^0$ -Massenspektrum wurden deutliche Signale sowohl für ω - als auch für ϕ -Zerfälle gefunden.

Abbildung 26 zeigt die daraus ermittelten Verhältnisse von ω - zu ρ^0 - bzw. ϕ - zu ρ^0 -Produktion als Funktion der Photonvirtualität. Diese Ergebnisse zeigen, dass die SU(4)-Symmetrie im Produktionsverhältnis, die schon bei kleinen Werten der Photonvirtualität in ω -Elektroproduktion beobachtet wurde, auch bei $Q^2 \simeq 12 \text{ GeV}^2$ gilt, im Gegensatz zur ϕ -Elektroproduktion, wo erst bei $Q^2 \simeq 4 \text{ GeV}^2$ der SU(4)-Symmetrie-Wert erreicht wird. Das Produktionsverhältnis von J/ψ zu ρ^0 ist, obwohl steil mit Q^2

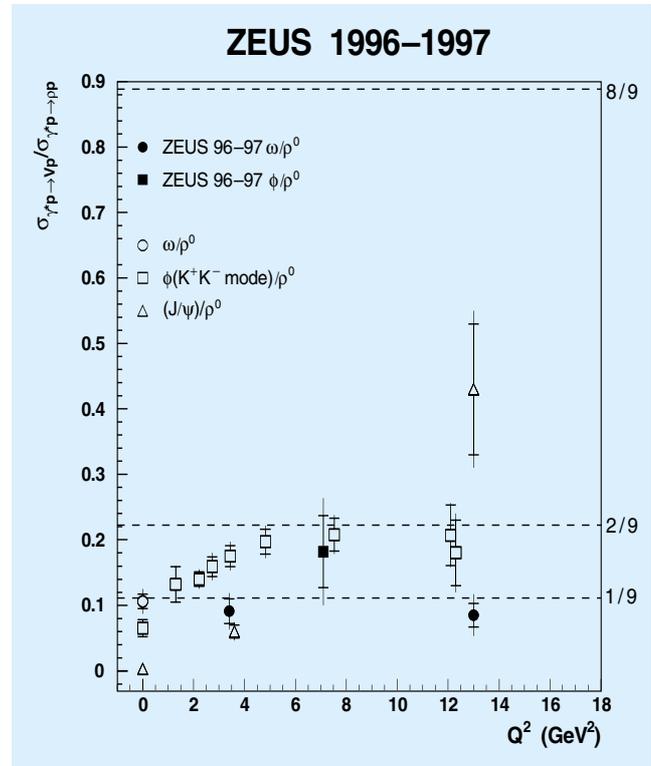


Abbildung 26: Die Verhältnisse der gemessenen ω - und ϕ -Elektroproduktionsquerschnitte zu dem für ρ^0 -Mesonen als Funktion der Photonvirtualität. Die neuen Messwerte sind durch die vollen Symbole dargestellt. Während das Verhältnis der ϕ/ρ^0 -Erzeugung den SU(4)-symmetrischen Wert erst bei höheren Q^2 erreicht, bleibt das Erzeugungsverhältnis von ω/ρ^0 bei dem entsprechenden SU(4)-Wert unabhängig von Q^2 . Das $(J/\psi)/\rho^0$ Produktionsverhältnis steigt steil mit Q^2 an, bleibt aber selbst bei $Q^2 \simeq 13 \text{ GeV}^2$ noch einen Faktor zwei kleiner als die SU(4)-Vorhersage.

ansteigend, selbst bei $Q^2 \simeq 13 \text{ GeV}^2$ noch um einen Faktor zwei kleiner als die SU(4)-Vorhersage. Diese Beobachtungen deuten auf einen Produktionsmechanismus hin, der bei genügend hohem Q^2 unabhängig von der erzeugten Quarksorte wird.

Messung von inklusiver Photo- produktion von D_s^\pm -Mesonen

Im Rahmen der Untersuchung von inklusiven Produktionsprozessen schwerer Quarks wurde eine Messung

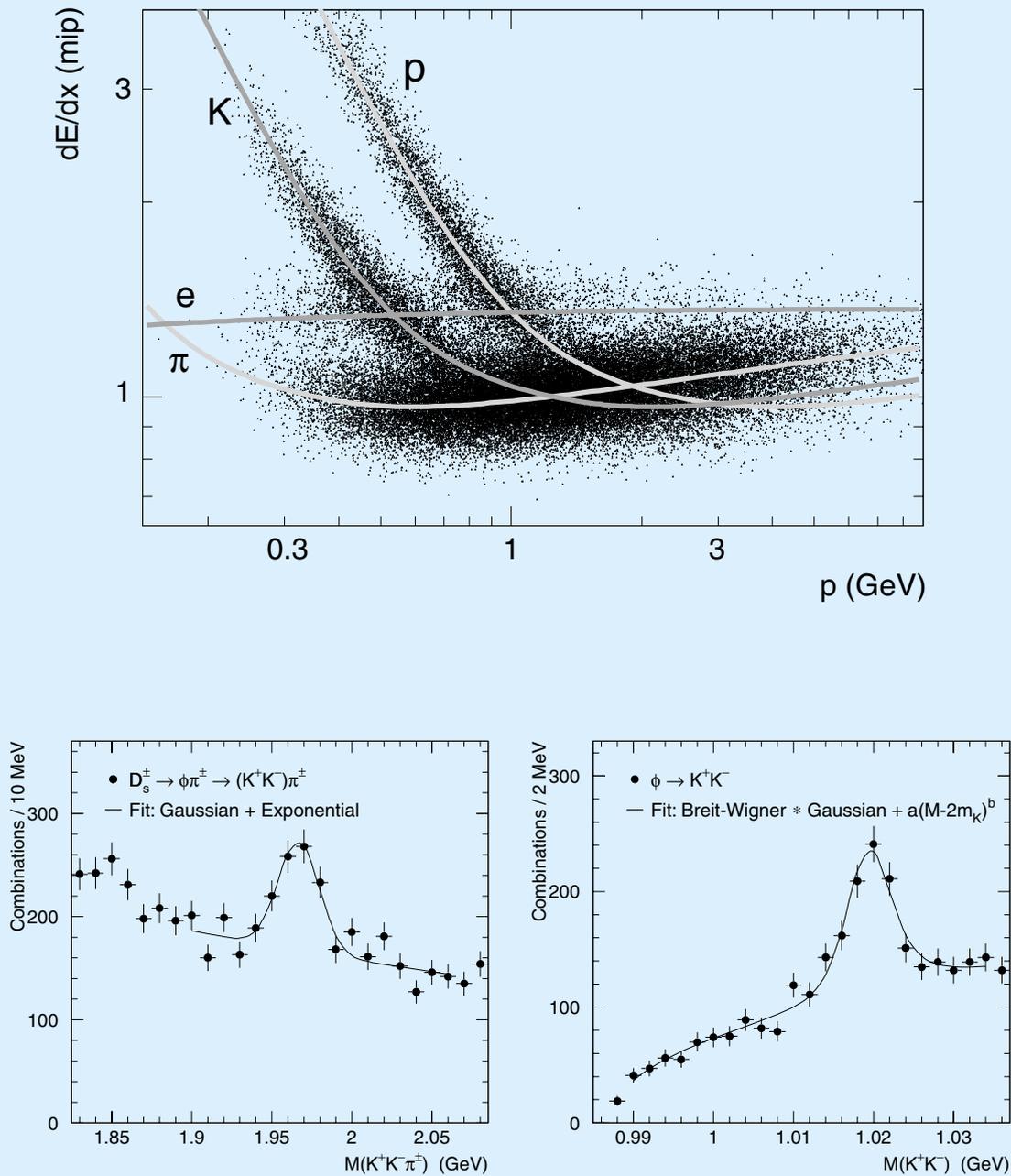


Abbildung 27: Normierte Energieverlustverteilungen in der zentralen Driftkammer. Eine deutliche Trennung von π , K und p (oben) ermöglicht die Unterdrückung von kombinatorischem Untergrund in den invarianten Massenspektren, die zur Identifizierung von ϕ - und D_s^\pm -Mesonen dienen (unten).

der Photoproduktion von D_s^\pm -Mesonen bei einer γp -Schwerpunktsenergie von $130 < W < 280$ GeV durchgeführt.

Die kombinatorischen Untergründe in den Massenspektren wurden durch Verwendung von dE/dx -Messungen in der zentralen Driftkammer unterdrückt (Abb. 27). Daraus ergibt sich das Verhältnis der Photoproduktionsquerschnitte von D_s^\pm - zu $D^{*\pm}$ -Mesonen zu

$$0.41 \pm 0.07(\text{stat.})_{-0.05}^{+0.03}(\text{syst.}) \pm 0.10(\text{br.})$$

und ein Strangeness-Unterdrückungsparameter im Lund-String-Fragmentationsmodell von

$$\gamma_s = 0.27 \pm 0.05 \pm 0.07(\text{br.}) .$$

Dabei bezeichnet (br.) die Unsicherheit durch das hadronische Verzweungsverhältnis der D_s^\pm -Mesonen in den gemessenen Zerfallskanal.

Dieses Ergebnis stimmt mit Messungen desselben Parameters für die Charm-Produktion in e^+e^- -Annihilationen überein. Das deutet darauf hin, dass die nicht perturbativ beschreibbare Hadronisierung der Charm-Quarks aus e^+e^- und $e p$ Kollisionen nach den gleichen Prinzipien abläuft.

Photoproduktion von B-Mesonen

Die Messung von dE/dx diente auch der Anreicherung eines Beauty-Signals, das zu einer Bestimmung des Wirkungsquerschnitts für die Photoproduktion von B-Mesonen führte. In Ereignissen mit zwei Jets und einem Elektron mit hohem Transversalimpuls konnte ein Überschuss beobachtet werden, der durch die semileptonischen Zerfälle von B-Mesonen verursacht wird. Abbildung 28 zeigt diesen Überschuss als Funktion vom Transversalimpuls p_T^{rel} des Elektrons be-

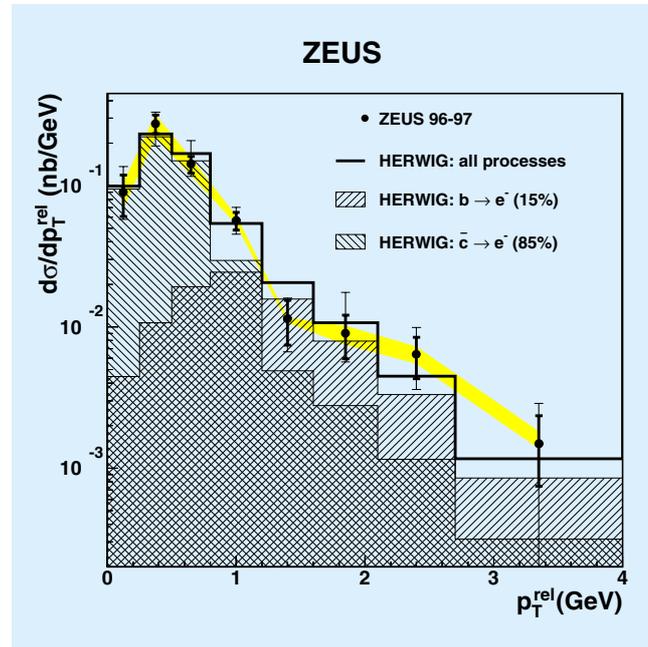


Abbildung 28: Der differentielle Wirkungsquerschnitt $d\sigma/dp_T^{\text{rel}}$ für die Reaktion $e^+ p \rightarrow e^+ + \text{dijet} + e^- + X$. p_T^{rel} ist der Transversalimpuls des Elektrons bezüglich der am nächsten liegenden Jetachse. Die schattierte Region zeigt die Unsicherheit, die durch die Ungenauigkeit der Energieskala des Urkalorimeters bei der Messung der Elektronenenergie der semileptonischen Zerfälle von Charm- und Beauty-Mesonen entsteht. Das Ergebnis des HERWIG-Simulationsprogramms wurde um einen Faktor 3.8 skaliert, um diesen Vergleich mit den ZEUS-Daten zu erhalten.

züglich der am nächsten liegenden Jetachse. Die semileptonischen Zerfälle von Charm-Teilchen reichen allein nicht aus, um die gemessene Verteilung zu erklären. Der Beauty-Photoproduktionsquerschnitt, der mittels dieses Identifikationsalgorithmus bestimmt werden konnte, liegt etwas höher als das Resultat einer NLO-QCD-Berechnung, was auch am Tevatron in $p\bar{p}$ -Wechselwirkungen beobachtet wurde.