

Abbildung 2: Reduzierter Wirkungsquerschnitt für den inklusiven NC-Streuprozess ($e^+p \rightarrow e^+X$) als Funktion des Impulsanteils x des gestreuten Quarks für verschiedene Werte Q^2 der Virtualität des ausgetauschten Bosons, verglichen mit einem auf QCD und der elektroschwachen Theorie beruhenden Fit. Der Anstieg des Wirkungsquerschnitts zu kleinen Werten von x wird durch eine stark ansteigende Dichte der Partonen (Quarks und Gluonen) im Proton interpretiert.

H1-Experiment

Beteiligte Institute: RWTH Aachen, Univ. Antwerpen, Univ. of Birmingham, Inter-Univ. ULB-VUB Brussels, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Inst. of Nucl. Phys. Cracow, JINR Dubna, Univ. Dortmund, CEN Saclay, DESY und Univ. Hamburg, Univ. und MPI Kernphys. Heidelberg, Univ. Kiel, Slovak Acad. Sci. Košice, Univ. of Lancaster, Univ. of Liverpool, QMWC London, Univ. of Lund, Univ. of Manchester, Univ. d'Aix-Marseille II, ITEP und Lebedev Inst. Moscow, MPI Phys. München, Univ. de Paris-Sud Orsay, Ec. Polytech. Palaiseau, Univ. Paris VI und VII, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: J. Dainton, Univ. of Liverpool und DESY (bis August 1999); E. Elsen, DESY (ab August 1999)

Das Berichtsjahr war geprägt durch eine sehr lange Periode der Datennahme. Der Luminositätsbetrieb von HERA begann schon im Januar 1999 und endete nach einigen kürzeren Unterbrechungen im Dezember 1999. Das H1-Experiment konnte im e^-p -Betrieb eine für die Physikanalyse nutzbare Luminosität von 14 pb^{-1} und im e^+p -Betrieb von 21 pb^{-1} akkumulieren. Der Detektor arbeitete während der langen Zeit sehr zufriedenstellend mit Ausnahme der Spurdetektoren, die durch zwei Drahtbrüche im zentralen Detektor und durch den Ausfall der Kühlung des Vorwärtsdetektors im letzten Drittel der Luminositätsperiode reduzierte Effizienzen aufwiesen. Im Berichtsjahr wurde intensiv an den Vorbereitungen des für das Jahr 2000 vorgesehenen größeren Detektorumbaus gearbeitet, der es erlauben wird, im Zuge des Programms zur Erhöhung der Luminosität von HERA die Messgenauigkeiten erheblich zu verbessern.

Im Berichtsjahr hat die H1-Kollaboration acht wissenschaftliche Arbeiten publiziert, die überwiegend auf der großen, in den Jahren 1994–1997 im e^+p -Betrieb akkumulierten Luminosität basieren. In diesem Bericht kann nicht auf alle Arbeiten eingegangen werden.

Es wurde eine umfangreiche Publikation zur tief-unelastischen inklusiven Positron-Proton-Streuung für hohe Werte Q^2 des Quadrates des Viererimpul-

ses des bei der Streuung ausgetauschten Eichbosons erarbeitet. Die Analyse umfasst sowohl die Prozesse des Neutralen Stromes (NC) ($e^+p \rightarrow e^+X$) als auch die des geladenen Stromes (CC) ($e^+p \rightarrow \bar{\nu}_e X$). Die Daten erlauben sowohl Tests des Standard-Modells in Bezug auf die Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung in einem Bereich, wo die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung vergleichbar stark werden, als auch die Untersuchung der inneren Struktur des Protons. Die Variation der Wirkungsquerschnitte für beide Prozesse über den großen erfassten Bereich der Skalenvariablen Q^2 und x kann im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) und der elektroschwachen Theorie sehr gut beschrieben werden (siehe Abb. 2 für den NC-Prozess). Die gute Übereinstimmung der Messungen mit dem Standard-Modell erlaubte es, Grenzen auf die Produktionsraten exotischer Teilchen wie Leptoquarks zu setzen.

Mehrere Arbeiten befassen sich mit Untersuchungen des hadronischen Endzustandes der tiefunelastischen Positron-Proton-Streuung. Messungen des Energieflusses und der Eigenschaften der produzierten Jets erlaubten detaillierte Vergleiche mit Vorhersagen der QCD.

Studien zur QCD wurden auch in exklusiven und semi-inklusive Prozessen durchgeführt. So erlaubte die Untersuchung der Produktion von vorwärts

gestreuten neutralen Pionen Tests der Parton-Dynamik im Bereich sehr kleiner Anteile des Partons am Gesamtimpuls des Protons. Die Produktion schwerer Quarks ist im Rahmen von Untersuchungen zur QCD besonders interessant, da bereits die hohen Massen von charm- oder bottom-Quarks eine hohe Energieskala setzen. Es wurde in diesem Zusammenhang sowohl die exklusive Produktion von J/ψ -Mesonen studiert, als auch der inklusive Wirkungsquerschnitt für bottom-Produktion bestimmt.

Datennahme und Detektor

Datennahme

Das Berichtsjahr war geprägt durch eine sehr lange Periode des HERA-Luminositätsbetriebes. Nach einer kurzen Betriebspause 1998/99, die zu kleineren Reparaturen und Optimierungen am H1-Detektor genutzt wurde, lief der e^-p -Luminositätsbetrieb schon im Januar 1999 wieder an. Bis zum Ende des e^-p -Betriebes im April 1999 konnte eine nutzbare Luminosität von 14 pb^{-1} im H1-Detektor aufgenommen werden, dies ist um einen Faktor drei höher als im e^-p -Betrieb 1998. Im Vergleich zu den sehr schwierigen Datennahmebedingungen von 1998 war in diesem Jahr der Strahluntergrund geringer, so dass auch die empfindlichen Spurdetektoren mit hoher Effizienz betrieben werden konnten.

Nach einer kurzen Unterbrechung im Mai/Juni konnte Anfang Juli der Luminositätsbetrieb, nun mit Positronen, wieder aufgenommen werden. Es zeigte sich, daß im e^+p -Betrieb, wie schon in früheren Jahren erfahren, gegenüber dem e^-p -Betrieb verbesserte Untergrundbedingungen herrschten. Die gute Datennahme-Effizienz ergab in Verbindung mit der langen Messzeit bis Mitte Dezember eine nutzbare Luminosität von 21 pb^{-1} . Dies erhöhte die totale bisher von H1 im e^+p -Betrieb akkumulierte Luminosität um mehr als 50% auf $\sim 60 \text{ pb}^{-1}$.

Spurdetektoren

Das insgesamt sehr positive Bild der Datennahme wurde durch im Berichtsjahr auftretende Probleme mit

den inneren Spurkammern getrübt. Nachdem während der Betriebsunterbrechung im Mai/Juni ein in der zentralen Jetkammer (CJC) gerissener Draht erfolgreich entfernt werden konnte, war dieser Detektor wieder voll effizient. Leider traten dann im September und Oktober erneut zwei Drahtbrüche auf, was zu einer Verschlechterung der CJC-Effizienz auf 87% führte. In der Weihnachtspause 1999/2000 konnten die beiden gerissenen Drähte erfolgreich aus der CJC entfernt werden. Im Oktober trat auch im Bereich der Vorwärtsspurkammern ein Problem auf. Die Kühlung dieses Detektor-teils konnte aufgrund eines Wasserlecks nicht aufrecht erhalten werden. Die Konsequenz war, dass zur Reduzierung der Wärmeentwicklung die Verstärker der radialen Spurkammern ausgeschaltet werden mussten und sich somit die Anzahl der verfügbaren Messpunkte entlang einer Spur verringerte. Trotz dieser Einschränkung lassen sich Spuren in Vorwärtsrichtung mit etwas reduzierter Effizienz rekonstruieren.

VLQ-Detektor

Das zum Nachweis von sehr kleinen Elektronstreuwinkeln ($\Theta_e \geq 15 \text{ mrad}$) eingebaute doppelarmige VLQ-(Very-Low- Q^2 -)Spektrometer wurde im Berichtsjahr in Betrieb genommen. Das VLQ-Spektrometer ist aus Wolfram-Szintillator-Kalorimetern und Halbleiter-Spurdetektoren aufgebaut. Es gelang, die Energieschwelle der Kalorimeter für den inklusiven Elektronen-Trigger zur Bestimmung der Proton-Strukturfunktion F_2 aus der Reaktion $ep \rightarrow eX$ auf 8 GeV zu reduzieren. Ein Koinzidenztrigger aus den Signalen beider Spektrometerarme erlaubt die Messung von Photon und Elektron aus dem QED-Compton Prozess $ep \rightarrow e'\gamma p$.

Zur Zeit wird an der Auswertung der mit dem VLQ aufgenommenen Daten gearbeitet. Die Energie-Eichung der Kalorimeter erfolgte mit Hilfe des „kinematischen Peaks“ der gestreuten Elektronen (Abb. 3a) sowie der Energiesumme $E_{e'} + E_\gamma$ aus dem QED-Compton-Prozess, die die Elektronenstrahl-Energie ergeben muss (Abb. 3b). Die Positionseichung von Kalorimetern und Halbleiter-Spurdetektoren wurde mit Ereignissen aus dem QED-Compton Prozess erreicht. Wie aus der Residuenverteilung zum Beispiel der Vertikalkoordinaten

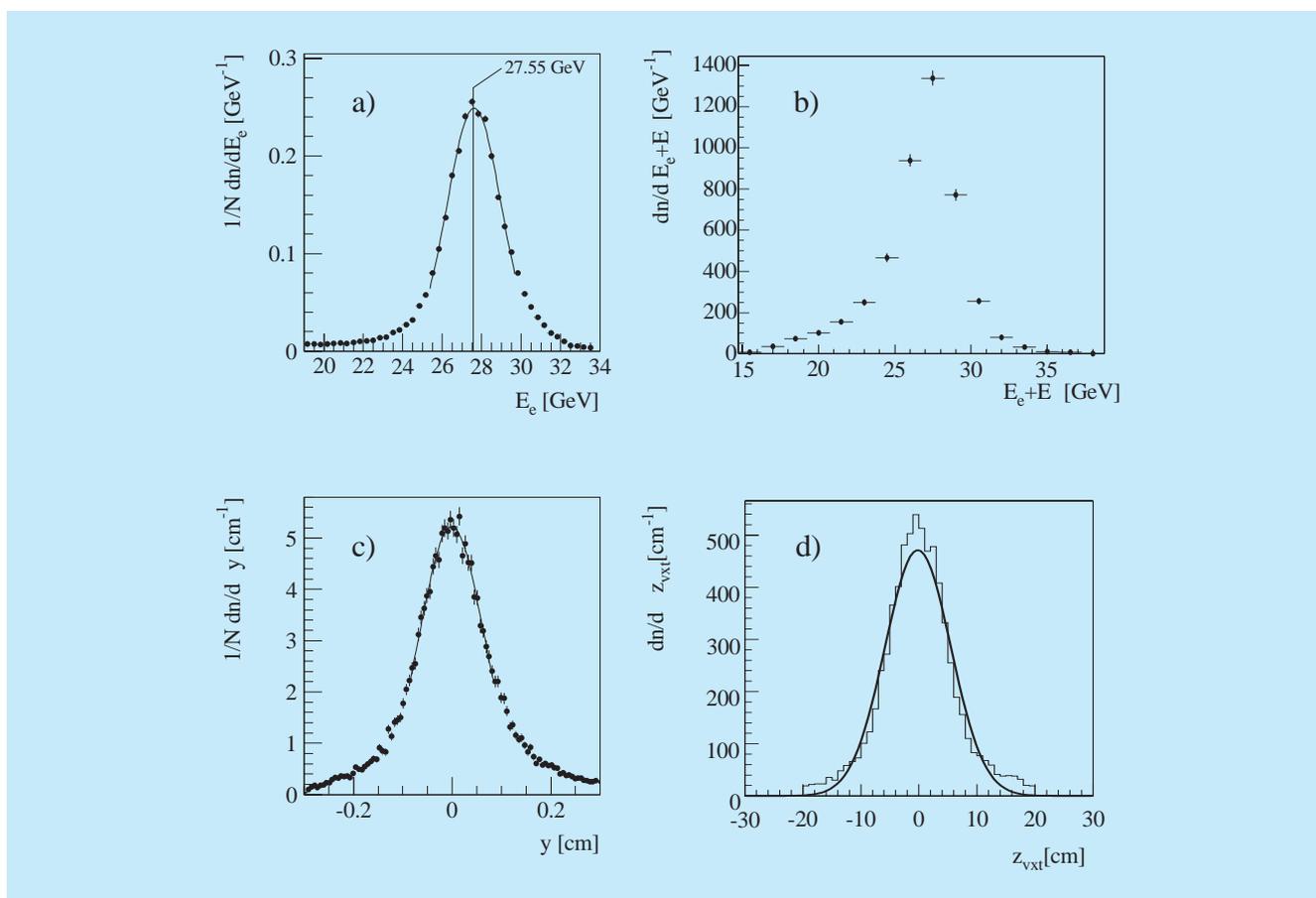


Abbildung 3: Erste Analyse-Resultate zur Kalibration der Energiemessung (a) (b) und der Ortsauflösung (c) (d) des VLQ-Spektrometers:

- (a) die Energie der gestreuten Positronen $E_{e'}$ aus der Reaktion $ep \rightarrow e' X$;
- (b) die Summe der Energien $E_{e'} + E_{\gamma}$ aus der Reaktion $ep \rightarrow e' \gamma p$;
- (c) die Differenz der y -Koordinaten gemessen mit dem Kalorimeter bzw. Spurdetektor;
- (d) die Differenz der z -Position des Ereignisvertex gemessen mit dem VLQ bzw. dem zentralen Spurdetektor.

von Kalorimetern und Spurdetektoren (Abb. 3c) hervorgeht, liegt die Ortsauflösung der Kalorimeter bei etwa 0.5 mm. Die Ortsauflösung der Spurdetektoren beträgt etwa 15 μm . Sie ermöglicht bei Elektronen-Streuwinkeln um 20 mrad die Bestimmung der z -Koordinate des primären ep -Reaktionsvertex entlang dem Strahl mit einer Präzision von etwa 6 cm (Abb. 3d). Die Daten des VLQ-Spektrometers werden es erlauben, die Strukturfunktion des Protons bei Q^2 - und x -Werten bis hinunter zu $Q^2 \sim 0.04 \text{ GeV}^2$ bzw. $x \sim 10^{-6}$ zu bestimmen.

Vorwärts-Proton-Spektrometer

Zur Untersuchung von Reaktionen mit einem energiereichen Proton in Vorwärtsrichtung wird dieses bei H1 im Vorwärts-Proton-Spektrometer (FPS) nachgewiesen. Im Berichtsjahr wurden zum ersten Mal während einer längeren Periode Daten mit dem horizontalen FPS-Detektorpaar bei 63 m und 80 m aufgezeichnet. Hier werden diffraktive Reaktionen erfasst, bei denen das Strahl-Proton weniger als 5% seiner Energie

verloren hat. Der Betrieb der beiden Stationen wurde durch hohen Untergrund erschwert. Dieser wurde einerseits durch Teilchen verursacht, welche die eigentlichen Strahlpakete verlassen haben und auf quasistabilen Bahnen weit außerhalb der Sollbahn umlaufen. Andererseits erhöhten Strahlaufweitungen durch den Betrieb der HERA-B-Targetdrähte den Untergrund und führten zu häufigen Unterbrechungen der Datennahme.

Die Physikanalyse der neuen FPS-Daten konzentriert sich zuerst auf Prozesse, die eine hohe Rate haben, wie die elastische Photoproduktion von ρ -Mesonen ($\gamma p \rightarrow \rho p$). In Koinzidenz zu einem im FPS nachgewiesenen Proton beobachtet man im zentralen H1-Detektor ρ -Mesonen, welche durch den Zerfall in zwei geladene Pionen nachgewiesen werden. Die elastische Photoproduktion von ρ -Mesonen erlaubt es, die Polarisation der ρ -Mesonen zu studieren und verschiedene Helizitäts-Amplituden der Reaktion zu bestimmen. Dies ermöglicht es, zu untersuchen, wie der Spin der Photons auf das ρ -Meson übertragen wird. Ferner ist die elastische Photoproduktion von ρ -Mesonen dazu geeignet, die Energieeichung des Vorwärts-Proton-Spektrometers zu überprüfen, da die Energie des gestreuten Protons aus den Messgrößen im Zentraldetektor rekonstruiert werden kann.

Detektorausbau für HERA2000

Für das Jahr 2000 ist ein Umbau der strahlführenden Magnete im Bereich der Wechselwirkungszonen von HERA geplant mit dem Ziel, eine Erhöhung der Luminosität für Elektron- (oder Positron-)Proton Kollisionen um einen Faktor fünf zu erreichen. Dies erfordert den Einbau zweier langer, dünner, supraleitender Magnete innerhalb des H1-Experiments. Die Planungen für die Montage und Justierung dieser Magnete sind im Jahre 1999 weitgehend abgeschlossen worden, und die Herstellung der einzelnen Komponenten hat begonnen.

Die geänderte Strahlführung erfordert ein neues zentrales Vakuumrohr, das zur Minimierung von Vielfachstreuung auf einer Länge von 1 m aus einer Beryllium-Aluminiumlegierung (Dicke 1.1% einer Strahlungslänge) hergestellt wird und einen elliptischen Querschnitt haben wird. Die vom Elektronen-Strahl in der Maschinenebene emittierte Synchrotronstrahlung darf

das Strahlrohr nicht im Bereich der Spurdetektoren treffen und wird außerhalb des Experiments absorbiert. Die in das Experiment zurückgestreute Synchrotronstrahlung wird von einer aufwendigen Anordnung von Kollimatoren absorbiert.

In der Vertikalen kann mit den Spurdetektoren sehr viel dichter an den Strahl herangegangen werden, was die Messgenauigkeit für die Zerfälle von Hadronen mit charm und bottom verbessert. Die Grenze wird hier von der Größe des Protonen-Strahls bei der Injektion und von der Stabilität des Vakuumrohres selbst gesetzt und hat zu der Wahl eines Strahlrohrquerschnittes von $123 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ geführt. Der Kollisionspunkt ist dabei gegenüber dem Mittelpunkt des Strahlrohres im Elektronen-Betrieb um 21.5 mm und im Positronen-Betrieb um 29.5 mm horizontal in Richtung des HERA-Ringzentrums verschoben, um zu vermeiden, dass das Strahlrohr von Synchrotronstrahlung getroffen wird. Das elliptische, exzentrische Strahlrohr hat Konsequenzen für die innersten Detektorkomponenten von H1.

Der zentrale H1-Vertexdetektor wird unter Wiederverwendung der Siliziumdetektoren an die elliptische Geometrie angepasst. Allerdings sind bei den integrierten CMOS-Schaltkreisen für die Signalverstärkung, Zwischenspeicherung und serielle Auslese 1998/99 während des HERA-Betriebs mit Elektronen Strahlenschäden aufgetreten. Es ist daher die Umstellung auf eine strahlenbeständigere Elektronik vorgesehen, in einer Technologie, wie sie für die LHC-Experimente am CERN (Genf) entwickelt worden ist.

Zusätzlich zum vorhandenen, aber zu modifizierenden, rückwärtigen wird ein vorwärtiger Siliziumdetektor gebaut. Beide werden aus jeweils fünf Doppellagen für die zweidimensionale Koordinatenbestimmung geladener Teilchen bestehen. Die Produktion der Siliziumdetektoren läuft mit sehr guter Qualität, und die Herstellung der mechanischen Kohlefaserkonstruktion hat begonnen. Alle drei Siliziumdetektoren zusammen werden 235 520 Auslesekanäle umfassen.

Für die neue zentrale Vieldraht-Proportionalkammer wurde ein Prototyp gebaut und erfolgreich getestet. Der Bau der fünfteiligen Kammer hat begonnen. Sie dient in der ersten Triggerstufe zur Bestimmung der Koordinate des Wechselwirkungspunktes entlang der Strahlachse. Es müssen die Signale von 9600 Elektroden alle 96 ns,

dem zeitlichen Abstand der ep-Kollisionen, an die Entscheidungselektronik übertragen werden. Dazu wurde eine elektro-optische Übertragungskette mit einer Datenrate von 832 Mbit/s entwickelt und erfolgreich getestet.

Die höhere Ereignisrate durch die erhöhte Luminosität erfordert die Erweiterung des Triggersystems von H1. Insbesondere soll die Erzeugung schwerer Quarks bereits nach wenigen hundert Mikrosekunden erkannt werden. Dazu wird ein Teil der Signale der zentralen Spurkammer (CJC) mit einem dreistufigen System schneller Logikbausteine und Prozessoren verarbeitet und verknüpft. Es soll die Spuren geladener Teilchen finden, die Spurparameter bestimmen und die invariante Masse für Spurkombinationen berechnen, wodurch Ereignisse mit schweren Quarks ausgewählt werden können.

Für den Vorwärts-Spurdetektor werden fünf neue planare Driftkammern (parallele Drähte senkrecht zur Strahlrichtung) mit jeweils acht Drahtlagen gebaut. Dieser Kammertyp hat sich im Vergleich zu den radialen Driftkammern als robuster im Betrieb bei HERA erwiesen. Die neuen Kammern ergänzen die vorhandenen neun planaren Kammern mit zwei zusätzlichen Projektionen und ermöglichen eine verbesserte Identifikation der Spuren geladener Teilchen, insbesondere in Verbindung mit dem neuen vorwärtigen Siliziumdetektor.

Die bestehende rückwärtige Driftkammer hat einen Innendurchmesser von 120 mm und passt damit nicht mehr auf das neue elliptische Strahlrohr. Als Ersatz wurde der Bau einer sechslagigen Vieldrahtproportionalnalkammer begonnen, die den Durchgangspunkt gestreuter Elektronen bestimmen soll. Für die Auslese der 5200 Drähte ist die integrierte Elektronik, wie sie für die Siliziumdetektoren von H1 entwickelt worden ist, vorgesehen.

Für die Messung der Luminosität ist ein neues Kalorimeter mit strahlenbeständigen Glasfasern und Absorberplatten aus Wolfram gebaut worden. Das in den Fasern von relativistischen Elektronen und Positronen erzeugte Čerenkovlicht wird mit Photoelektronen-Vervielfachern nachgewiesen. Der Detektor hat den Vorteil, unempfindlich für Synchrotronstrahlung zu sein. Das Kalorimeter ist bereits in einem Teststrahl am CERN (Genf) kalibriert worden, wobei die erwartete Energieauflösung von $21\%/\sqrt{E}$ erreicht wurde. Die

Elektronik zur schnellen und genauen Bestimmung der Luminosität ist in Produktion.

Das FPS erhält neue Detektoren aus verbesserten zintillierenden Fasern, die auch strahlungsresistenter sind als die alten. Bei diesem Umbau wird auch die geometrische Anordnung der Fasern geändert, um eine größere Ansprechwahrscheinlichkeit zu erreichen.

Physikalische Ergebnisse

Im Folgenden werden einige der im Berichtsjahr veröffentlichten Analysen etwas näher erläutert.

Tiefunelastische ep-Streuung

Im Berichtsjahr wurde eine umfangreiche Veröffentlichung zur tiefunelastischen e^+p -Streuung bei hohen Impulsüberträgen ($Q^2 > 150 \text{ GeV}^2$) erarbeitet, die alle bis Ende 1997 erfassten Daten, entsprechend einer Luminosität von 37 pb^{-1} , berücksichtigt.

Einige Teilaspekte der Resultate wurden bereits im Jahresbericht 1998 beschrieben. In tiefunelastischer Streuung wechselwirkt das Positron mit einem Konstituenten (Quark) des Protons unter Austausch eines Eichbosons der elektroschwachen Wechselwirkung.

Streuwirkungsquerschnitte wurden sowohl für neutrale Ströme (NC, Photon und Z-Boson Austausch) als auch für geladene Ströme (CC, W-Boson Austausch) gemessen. Die kinematischen Messgrößen sind dabei die Virtualität Q^2 des ausgetauschten Eichbosons und der relative Impulsanteil x des Quarks am Gesamtimpuls der Protons. Der Photon-Austausch dominiert die NC-Prozesse, nur bei hohen Werten von Q^2 trägt auch der Z^0 -Austausch signifikant bei.

Abbildung 2 zeigt den um kinematische Vorfaktoren reduzierten NC-Wirkungsquerschnitt als Funktion von x für verschiedene Werte von Q^2 , dabei ist $1/\sqrt{Q^2}$ ein Maß für die Auflösung, mit der die Struktur des Protons untersucht wird. Das höchste erreichte Q^2 entspricht einer Auflösung von 10^{-16} cm , das heißt einem Tausendstel des Proton-Radius. Wie schon in den frühen HERA-Resultaten bei kleinen Werten von Q^2 gesehen, steigt auch in den jetzt zugänglichen Bereichen von ho-

hen Q^2 der Wirkungsquerschnitt zu kleinen Werten von x stark an. Dieses wird durch eine zu kleinen x stark ansteigende Parton-Dichte erklärt.

Im Rahmen der Theorie der Quantenchromodynamik (QCD) wird versucht, den Aufbau des Protons aus Quarks und Gluonen quantitativ zu verstehen. Obwohl es bisher nicht möglich ist, die x -Verteilung bei festem Q^2 theoretisch zu berechnen, wird dennoch die Variation mit Q^2 durch die QCD vorhergesagt. Die in Abbildung 2 eingezeichneten Kurven zeigen, dass der Verlauf des Wirkungsquerschnitts über den gesamten Bereich von x und Q^2 sehr gut im Rahmen der QCD und der elektroschwachen Theorie verstanden werden kann.

Im Gegensatz zu NC-Prozessen, in denen das Photon oder Z-Boson an alle Quarks koppelt, werden in der

CC-Streuung nur bestimmte Quark-Sorten selektiert. Im Falle der e^+p -Streuung kann das ausgetauschte W^+ -Boson nur an negativ geladene Quarks, das heißt an d-Quarks oder an See-Quarks (\bar{u} , \bar{c} , s) koppeln. Abbildung 4 zeigt den reduzierten CC-Wirkungsquerschnitt als Funktion von x für verschiedene Werte von Q^2 . Die gute Übereinstimmung mit der in der Abbildung dargestellten QCD-Anpassung zeigt, dass sich auch die Kopplung des W-Bosons an die Quarks wie im Standard-Modell erwartet verhält. Bei hohen Werten von x dominiert der Beitrag der d-Quarks. Zusätzlich zur Sensitivität auf die Quark-Sorte ist die CC-Wechselwirkung auch auf die Helizität (Ausrichtung des Quark-Spins) sensitiv. Für Positronen führt die Streuung an Quarks zum Gesamtspin 1 des Positron-Quark-Systems, während die Streuung an Antiquarks zum Gesamtspin 0 führt. Ein Gesamtspin 0 führt zu einer flachen Verteilung in der Inelastizität y , während ein Gesamtspin von 1 zu einer $(1 - y)^2$ -Verteilung

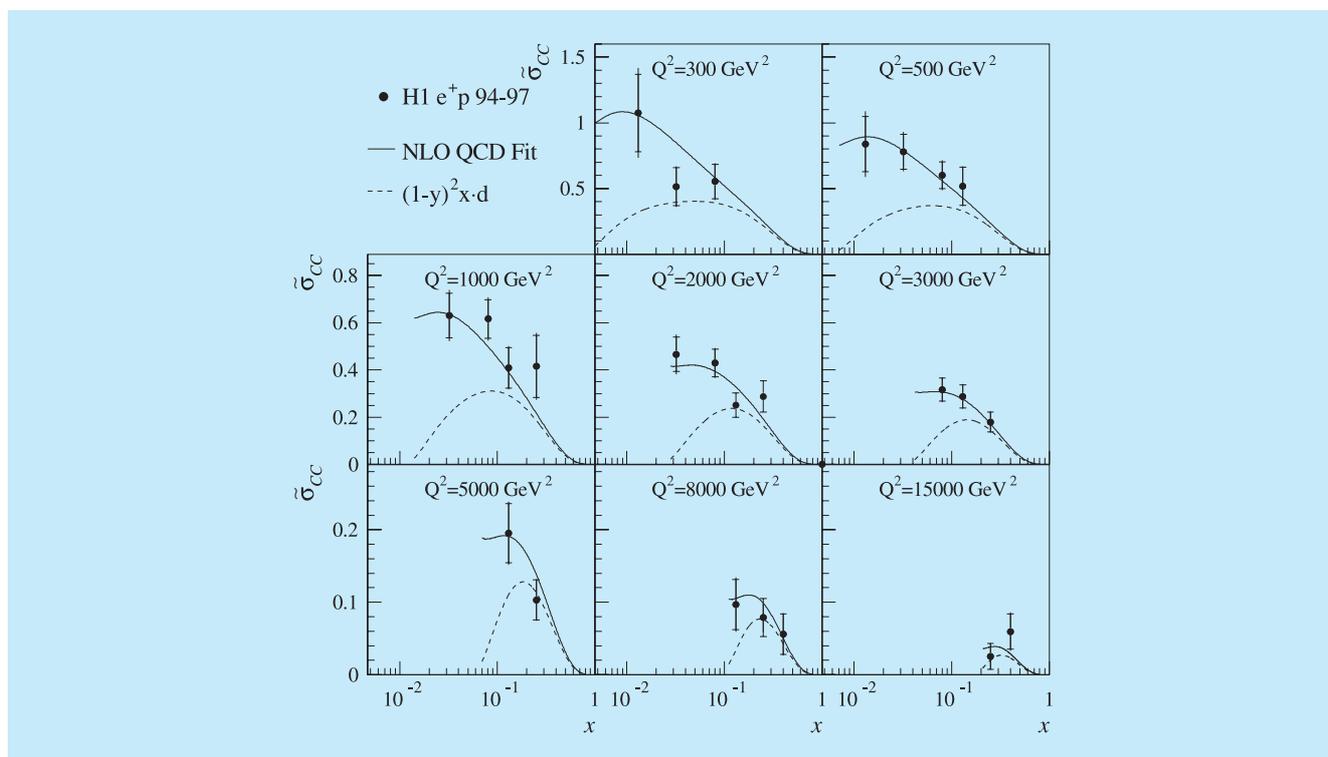


Abbildung 4: Reduzierter Wirkungsquerschnitt für den inklusiven CC-Streuprozess ($e^+ p \rightarrow \bar{\nu}_e X$) als Funktion des Impulsanteils x des gestreuten Quarks für verschiedene Werte Q^2 der Virtualität des ausgetauschten Bosons, verglichen mit einem auf QCD und der elektroschwachen Theorie beruhenden Fit. Die Wirkungsquerschnitte bei hohen x sind ein Maß für die Dichte der d-Quarks im Proton.

führt. Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Ereignisse als Funktion von y für verschiedene Werte von x . Für kleine x ($x = 0.08$) misst man eine flache Verteilung, überlagert mit einer $(1 - y)^2$ -Komponente. Dies ist der Bereich, wo neben dem d-Quark auch Antiquarks aus dem See signifikant zum Streuprozess beitragen. Für hohe x ($x = 0.25$) ist der flache Anteil verschwunden, das heißt man streut nur noch am d-Quark. Die hier sichtbare Sensitivität auf die Quark-Struktur des Protons zeigt, dass es mit den nach 2000 erreichbaren hohen Luminositäten für e^+ - und e^- -Streuung möglich sein wird, einzelne Quark- und Antiquark-Verteilungen quantitativ zu bestimmen.

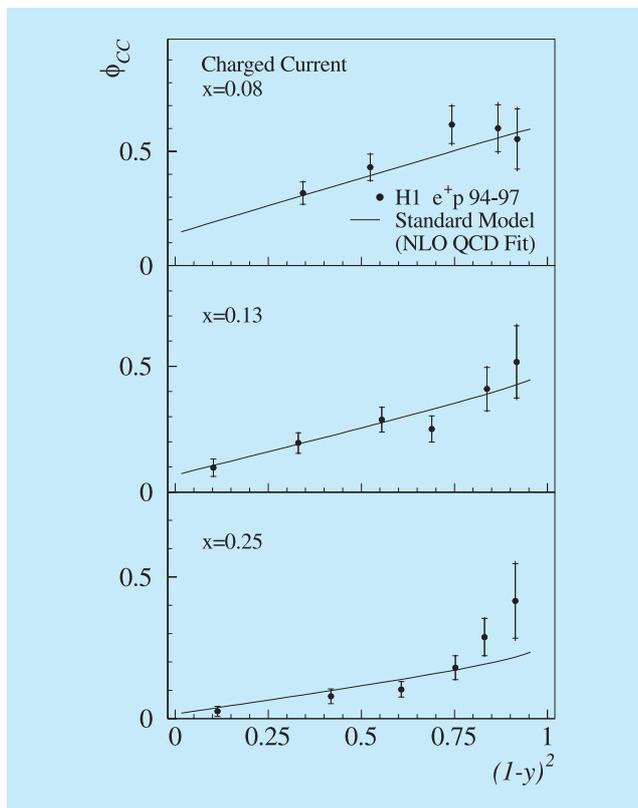


Abbildung 5: Verteilung der Ereignisse des inklusiven CC-Streuprozesses ($e^+p \rightarrow \bar{\nu}_e X$) als Funktion des Inelastizitätsparameters y für drei Werte des Impulsanteils x des gestreuten Quarks, verglichen mit einem auf QCD und der elektroschwachen Theorie beruhenden Fit. Die Daten bestätigen die im Standard-Modell erwarteten Abhängigkeiten der CC-Streuung von der Art (Quark oder Antiquark) und der Helizität des wechselwirkenden Quarks.

Die Untersuchung tiefunelastischer Streuung bei höchsten Q^2 eröffnet auch die Möglichkeit, in einem bisher unerforschten Energiebereich nach Physik jenseits des Standard-Modells zu suchen. Sollte es in der Natur sogenannte Leptoquarks (LQ) geben, wäre die ep-Streuung bei HERA eine ideale Möglichkeit, diese zu produzieren, da im Anfangszustand ein Lepton (das Positron) und ein Quark (aus dem Proton) bei hoher Energie wechselwirken. Diese beiden Teilchen könnten zu einem Leptoquark definierter Masse fusionieren. Die Leptoquarks werden wieder in ein Quark und Lepton zerfallen. Für den Fall, dass die Zerfallsprodukte des Leptoquarks wieder Teilchen der ersten Generation (ν_e, e, u, d) sind, unterscheidet sich die Topologie einzelner Ereignisse nicht von der der tiefunelastischen NC- und CC-Ereignisse. Man erwartet jedoch Abweichungen in den Verteilungen der Ereignisse in Bezug auf die kinematischen Variablen x und y . Das Interesse an der Suche nach Leptoquarks erhöhte sich stark, als sich in den von der H1- und der ZEUS-Kollaboration bis Ende 1996 aufgenommenen Teildatensätzen (14 pb^{-1} für H1) Abweichungen von den Vorhersagen des Standard-Modells in diesen Verteilungen abzeichneten.

Die H1-Kollaboration hat nun in den gesamten zur Verfügung stehenden Daten sowohl im NC- als auch im CC-Kanal nach Leptoquarks der ersten Generation gesucht. Aus der Tatsache, dass dabei keine statistisch signifikante Abweichung von der Standard-Modell-Erwartung mehr beobachtet werden konnte, wurden Grenzen auf die Produktion von Leptoquarks abgeleitet. Die Grenzen hängen von der Masse des Leptoquarks M_{LQ} , seinem Verzweigungsverhältnis β für den Zerfall $LQ \rightarrow e q$ und der Lepton-Quark Kopplung λ ab. Für zwei verschiedene λ -Werte ist in Abbildung 6 die mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% ausschließbare Region in der β - M_{LQ} Ebene für den Fall der e^+d - und e^+u -Kopplung dargestellt. Die von der H1-Kollaboration ermittelten Ausschließungsbereiche gehen weiter als die am Tevatron (Batavia, USA) gemessenen. Es zeigt sich auch, dass für sehr kleine Werte von β Leptoquarks im HERA-Energiebereich nicht ausgeschlossen sind.

Die H1-Kollaboration hat die Suche auch auf solche Leptoquarks ausgedehnt, die Übergänge zur zweiten und dritten Fermion-Generation erlauben. Die Prozesse $e^+q \rightarrow LQ \rightarrow \mu q$ und $e^+q \rightarrow LQ \rightarrow \tau q$ führen zu Ereignissen ähnlich den NC-Ereignissen, aber statt des

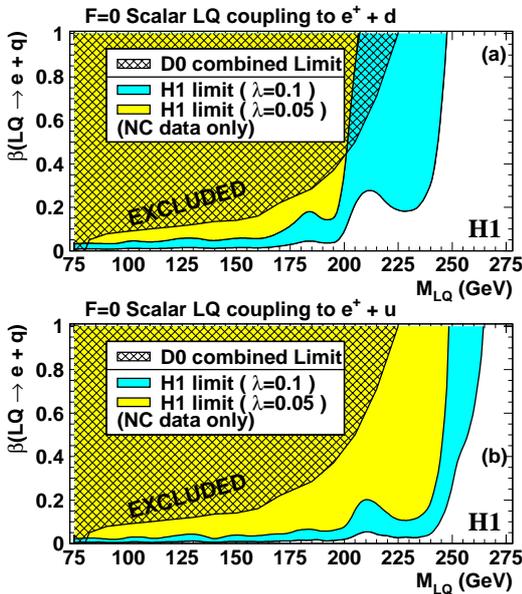


Abbildung 6: Massenabhängige Ausschließungsgrenzen (95% CL) auf das Verzweigungsverhältnis $\beta(LQ \rightarrow eq)$ für skalare Leptoquarks, produziert in e^+d - oder e^+u -Fusion für zwei Werte des LQ-Kopplungsparameters λ . Der Wertebereich oberhalb der Kurven ist ausgeschlossen. Verglichen mit den am Tevatron (D0) erhaltenen Grenzen schließen die H1-Resultate einen größeren Parameterbereich in M_{LQ} und β aus, besonders für kleine Werte von β .

gestreuten Positrons wird ein Myon oder Tauon im Endzustand beobachtet. Es konnten im gesamten Datensatz keine Ereignisse gefunden werden, die mit den erwarteten Charakteristika der Produktion und des Zerfalls von Leptoquarks kompatibel waren. Insbesondere sind die im Jahresbericht 1998 (Seite 50) erwähnten anomalen Myon-Ereignisse nicht mit der Kinematik einer Leptoquark-Produktion verträglich.

Hadronischer Endzustand in tiefunelastischer Streuung

In mehreren Veröffentlichungen wurden Eigenschaften des in tiefunelastischer NC-Streuung erzeugten

hadronischen Endzustands untersucht mit dem Ziel, das Verständnis der Prozesse der starken Wechselwirkung zu erweitern. Der hadronische Endzustand wird durch die Wechselwirkung des ausgetauschten Eichbosons (dominant ein virtuelles Photon γ^*) mit dem Proton erzeugt. Es wurden sowohl globale Charakteristika des hadronischen Endzustands untersucht, wie der Fluss transversaler Energie oder Ereignisvariable, die die Jet-Charakteristik der Ereignisse quantifizieren, als auch spezielle Endzustände, wie zum Beispiel die inklusive Produktion von π^0 -Mesonen.

Die hohe, bei HERA erreichbare γp -Schwerpunktsenergie erlaubt es, über weite kinematische Bereiche die experimentellen Resultate mit den Vorhersagen perturbativer QCD zu konfrontieren. Insbesondere ist es auch möglich, den Bereich sehr kleiner relativer Parton-Impulse x , in dem die Parton-Dichten stark ansteigen, mit genügend guter Auflösung zu untersuchen.

Transversaler Energiefluss

Es wurde der Fluss von Energie transversal zur Photon-Proton-Richtung im hadronischen Schwerpunktsystem als Funktion der Skalensvariablen x , Q^2 und der Pseudorapidität η^* gemessen. Die Variable η^* ist direkt mit dem Polarwinkel Θ korreliert, wobei hier positive Werte von η^* Teilchenproduktion in Photon-Richtung und negative solche in Proton-Richtung charakterisieren. Messungen des Energieflusses als Funktion von η^* erlauben es, die Hadron-Formation vom Photon-Fragmentationsbereich über den zentralen Bereich bis hin zum Proton-Fragmentationsbereich zu studieren.

Abbildung 7 zeigt für einen festen Wert der Photon-Proton Schwerpunktsenergie die Verteilung der mittleren transversalen Energie E_T als Funktion von η^* für verschiedene Werte der Photon-Virtualität Q^2 . Es zeigt sich hier, dass das Maximum des E_T -Flusses mit Q^2 ansteigt und sich dabei zu zentraleren Werten von η^* verschiebt.

Dies ist ein erster experimenteller Hinweis, dass auch im zentralen Bereich ($-0.5 < \eta^* < 0.5$), das heißt außerhalb der Fragmentationsregion des Photons ($2 < \eta^* < 3$), die mittlere transversale Energie mit der Photon-Virtualität Q^2 ansteigt. Bei der tiefunelastischen

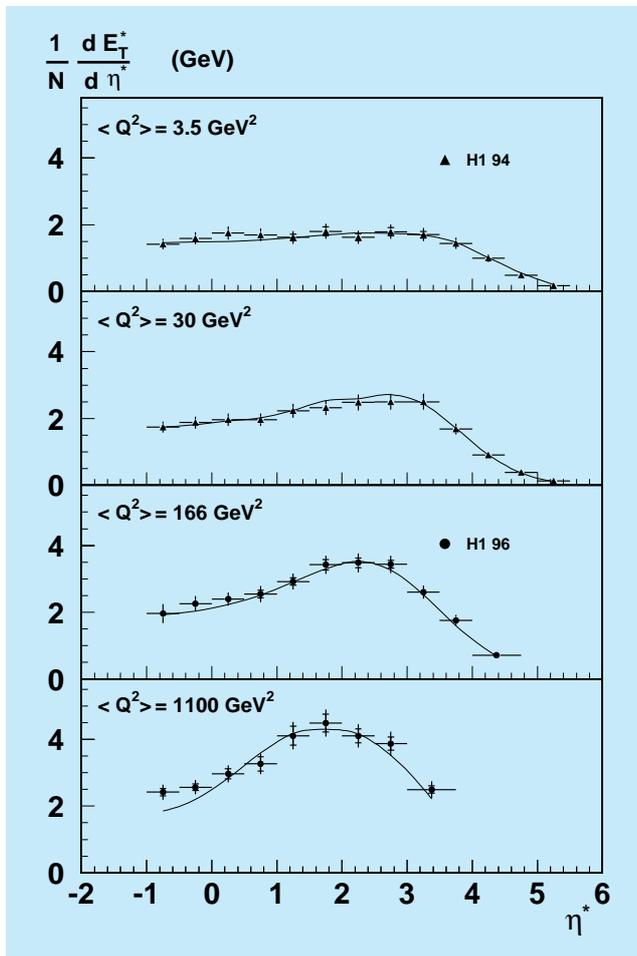


Abbildung 7: Der mittlere transversale Energiefluss in tiefunelastischen Streueignissen bei fester Photon-Proton-Schwerpunktsenergie als Funktion der Pseudorapidität η^* für verschiedene Bereiche der Photon-Virtualität Q^2 , verglichen mit dem auf QCD basierenden Modell LEPTO. Mit wachsendem Q^2 wird ein Anstieg von E_T beobachtet, wobei sich das Maximum vom Photon-Fragmentationsbereich ($2 < \eta^* < 3$) zu kleineren η^* -Werten (zentraler Bereich) verschiebt.

ep-Streuung wird also eine charakteristische Abhängigkeit von der Photon-Virtualität Q^2 beobachtet, die sich von der Unabhängigkeit vom „Projektil“, wie sie für den E_T -Fluss im zentralen Bereich bei Hadron-Hadron-Streuung bekannt ist, unterscheidet. Die Messung des E_T -Flusses wird gut von auf QCD basierenden Modellen beschrieben. Als Beispiel ist die Vorhersage des LEPTO-Modells in Abbildung 7 gezeigt.

Jet-Charakteristika

In tiefunelastischer Streuung wurden über einen weiten Bereich der Photon-Virtualität ($7 < Q < 100 \text{ GeV}$) Größen studiert, die die Jet-Struktur des hadronischen Endzustands quantitativ beschreiben. Dazu gehören unter anderem die Variablen „Thrust“, „Jet broadening“, Jetmasse und Zwei-Jet-Rate. In den Verteilungen dieser Variablen werden harte Streuprozesse sichtbar, die sich durch QCD-Störungsrechnungen beschreiben lassen. Allerdings werden diese QCD-Vorhersagen durch die Hadronisation der Partonen in die beobachtbaren Teilchen überlagert. In Abbildung 8 sind die Mittelwerte einiger dieser Ereignisvariablen als Funktion von Q , was hier der zur Hadronisation zur Verfügung stehenden Energie entspricht, dargestellt und mit der rein perturbativen sowie der um nichtperturbative Hadronisations-Effekte erweiterten QCD-Vorhersage verglichen. Hierbei wurde ein theoretischer Ansatz versucht, die Hadronisations-Effekte durch Potenzkorrekturen in $1/Q$ mit einem nichtperturbativen universellen Parameter $\bar{\alpha}_0$ zu beschreiben. In der Anpassung der Vorhersagen an die Daten sind die starke Kopplungskonstante α_s und $\bar{\alpha}_0$ die einzigen freien Parameter. Abbildung 9 zeigt die resultierenden Werte dieser Parameter für die Anpassungen an die verschiedenen Ereignisvariablen.

Es ist erstaunlich, dass die a priori sehr komplizierten Hadronisations-Effekte durch einen für die verschiedenen Variablen gemeinsamen Wert des Parameters $\bar{\alpha}_0$ von ~ 0.5 im Rahmen einer $\pm 20\%$ Streuung beschrieben werden können. Allerdings streuen die bei den verschiedenen Ereignisvariablen erhaltenen Werte für α_s und $\bar{\alpha}_0$ mehr als aufgrund der experimentellen Unsicherheiten erwartet. Der hier untersuchte theoretische Ansatz, die Hadronisation durch Potenzkorrekturen zu berechnen, ist sicher ein vielversprechender erster Schritt und könnte möglicherweise durch Berücksichtigung höherer Ordnungen in α_s verbessert werden.

Inklusive π^0 -Produktion

Die zentrale Rapiditätsregion ist besonders sensitiv auf QCD-Effekte in der Formation des hadronischen Endzustands. Bei sehr kleinen Werten von x gibt es noch

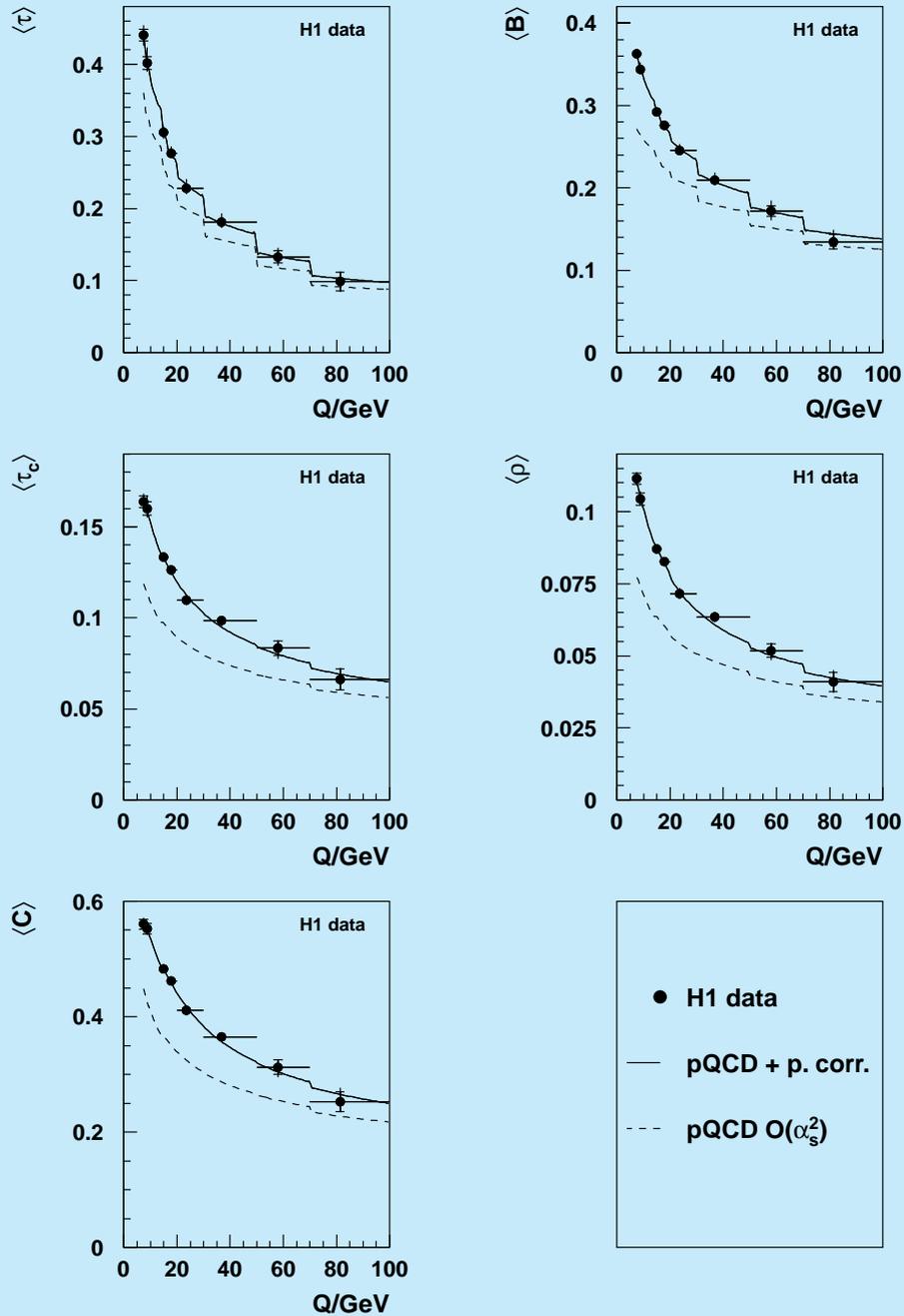


Abbildung 8: Mittelwerte einiger Variablen zur Charakterisierung der Jet-Struktur des hadronischen Endzustands in tiefinelastischer Streuung als Funktion der Photon-Virtualität Q . Die Messungen liegen für alle Variablen oberhalb der Erwartungen einer rein perturbativen QCD-Rechnung (gestrichelte Kurven). Die zusätzliche Berücksichtigung nichtperturbativer Hadronisations-Effekte durch Potenzkorrekturen in $1/Q$ beschreibt die Messungen sehr gut (durchgezogene Kurven).

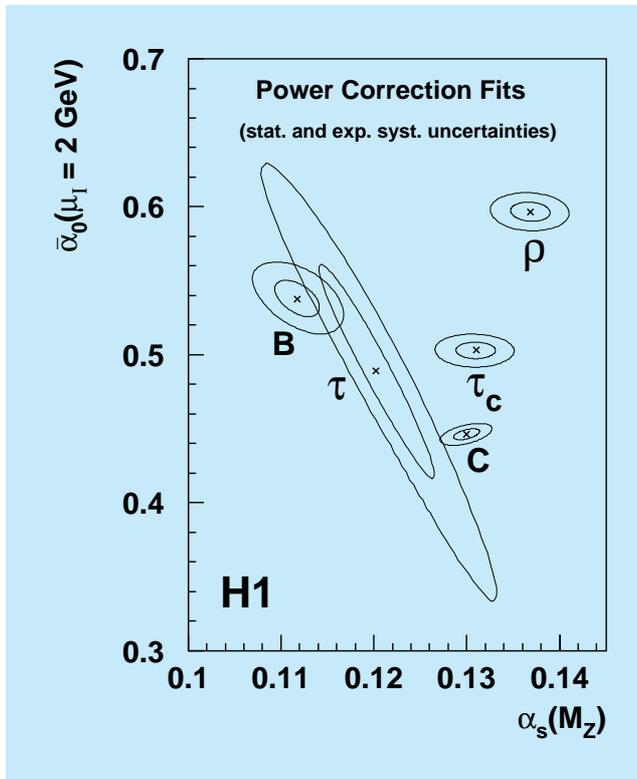


Abbildung 9: Fitresultate für die starke Kopplungskonstante α_s und den Parameter $\bar{\alpha}_0$, der die Hadronisations-Effekte durch Potenzkorrekturen in $1/Q$ beschreibt. Die Werte resultieren aus Anpassungen an verschiedene, die Jet-Struktur tiefinelastischer Streueignisse beschreibende Ereignisvariablen. Die Kurven beziehen sich auf die 1σ und 2σ Konfidenzgrenzen unter Berücksichtigung der experimentellen Unsicherheiten.

keine eindeutige perturbative QCD-Vorhersage. Verschiedene Approximationen (DGLAP, BFKL), die gerechnet wurden, machen unterschiedliche Vorhersagen für den Teilchenfluss in dieser Region. Insofern ist das Interesse an experimentellen Daten hier besonders groß.

Im Laborsystem entspricht die zentrale Rapiditäts-Region dem Bereich kleiner Polarwinkel relativ zur Proton-Richtung. Die H1-Kollaboration hat in diesem Bereich die inklusive Produktion von π^0 -Mesonen als Funktion der Skalenvariablen x und Q^2 , des Transversalimpulses und der Rapidität des π^0 untersucht. Gegenüber früheren Messungen war es möglich, in Bereiche höherer Transversalimpulse vorzustoßen. Dies er-

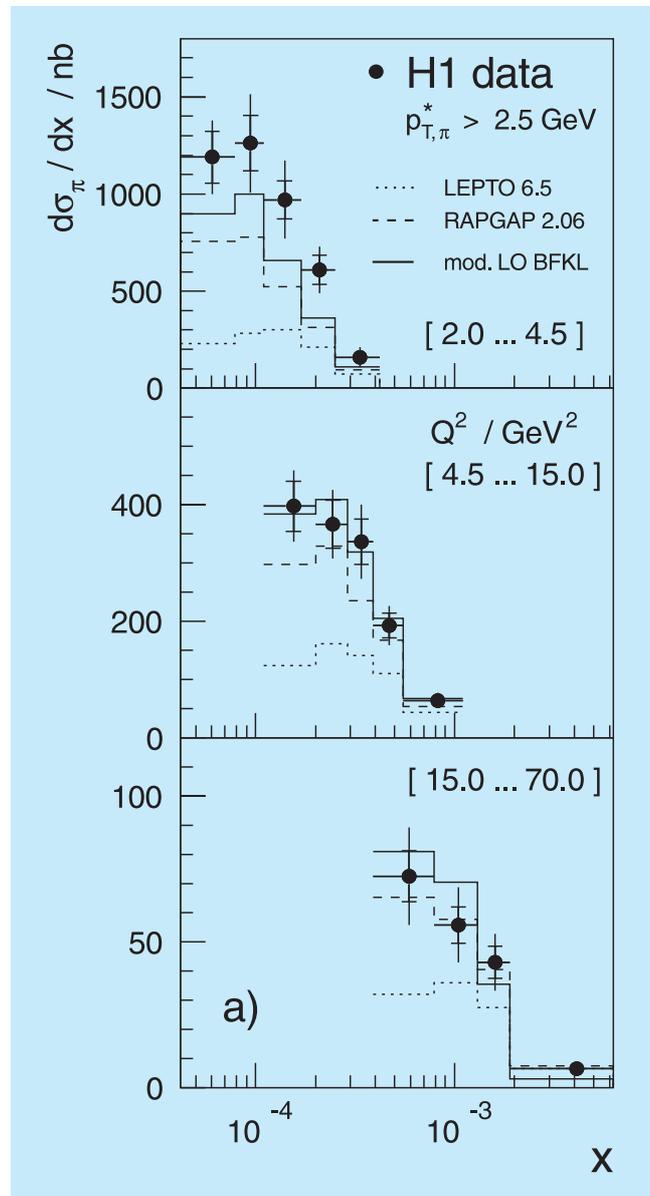


Abbildung 10: Inklusiver π^0 -Produktionswirkungsquerschnitt als Funktion der Skalenvariablen x für drei Bereiche der Photon-Virtualität Q^2 . Die Daten sind verglichen mit drei Modellen, die verschiedenen QCD-Approximationen entsprechen.

laubt sensitivere Vergleiche mit QCD-Vorhersagen zur Emission harter Partonen. Abbildung 10 zeigt den inklusiven π^0 -Wirkungsquerschnitt als Funktion der Skalenvariablen x für drei Bereiche der Photon-Virtualität Q^2 . Zu beobachten ist ein sehr starker Anstieg der π^0 -

Produktion zu kleinen Werten von x in allen Bereichen von Q^2 . Es zeigt sich auch, dass besonders im niedrigsten Q^2 -Bereich die Daten sehr schlecht von den auf der DGLAP-Approximation beruhenden QCD-Vorhersagen beschrieben werden und besser mit einer BFKL-Entwicklung übereinstimmen. Da jedoch beide QCD-Rechnungen nur in führender Ordnung vorliegen, ist diese Präferenz vermutlich nicht die endgültige Antwort.

Erzeugung schwerer Quarks

Im Berichtsjahr wurden zwei Publikationen veröffentlicht, die sich auf die Produktion schwerer Quarks in ep-Wechselwirkungen beziehen. Es wurden die Erzeugung des J/ψ -Mesons, einem gebundenen Zustand aus charm-anticharm-Quarks, und die inklusive Erzeugung von bottom-Quarks untersucht.

Die Produktion schwerer Quarks ist im Rahmen von Untersuchungen zur QCD besonders interessant, da die hohe Masse von charm- oder bottom-Quarks eine hohe Energieskala setzt, was störungstheoretische Berechnungen ermöglicht.

Erzeugung von J/ψ -Mesonen

Die Erzeugung von J/ψ -Mesonen ist bei HERA ausführlich in Photoproduktion, das heißt $Q^2 \simeq 0$, untersucht worden. Im Berichtsjahr wurde eine umfassende Studie zur J/ψ -Produktion mit virtuellen Photonen ($Q^2 > 2 \text{ GeV}^2$) vorgelegt. Es wurden zwei Mechanismen unterschieden: der zahlenmäßig dominierende Prozess ist die elastische Erzeugung von J/ψ , bei der das gestreute Proton im Allgemeinen nicht beobachtet wird, das heißt es werden nur die Zerfalls-Leptonen des J/ψ im Detektor nachgewiesen. Der andere Mechanismus ist ein unelastischer, in dem das J/ψ zusammen mit weiteren Hadronen beobachtet wird.

Das J/ψ ist ein Vektormeson, wie auch die leichten ρ -, ω - und ϕ -Mesonen, und kann ebenso wie diese direkt an das vom Positron emittierte Photon koppeln und anschließend über einen diffraktiven Prozess am Proton gestreut werden. Diffraktive Streuung wurde bei niedrigen Energien sowohl in Hadron-Hadron Wechselwirkungen als auch in Photon-Hadron Streuung durch nicht-störungstheoretische Modelle beschrieben. Auch bei HERA liefern diese für die leichten Vektormesonen

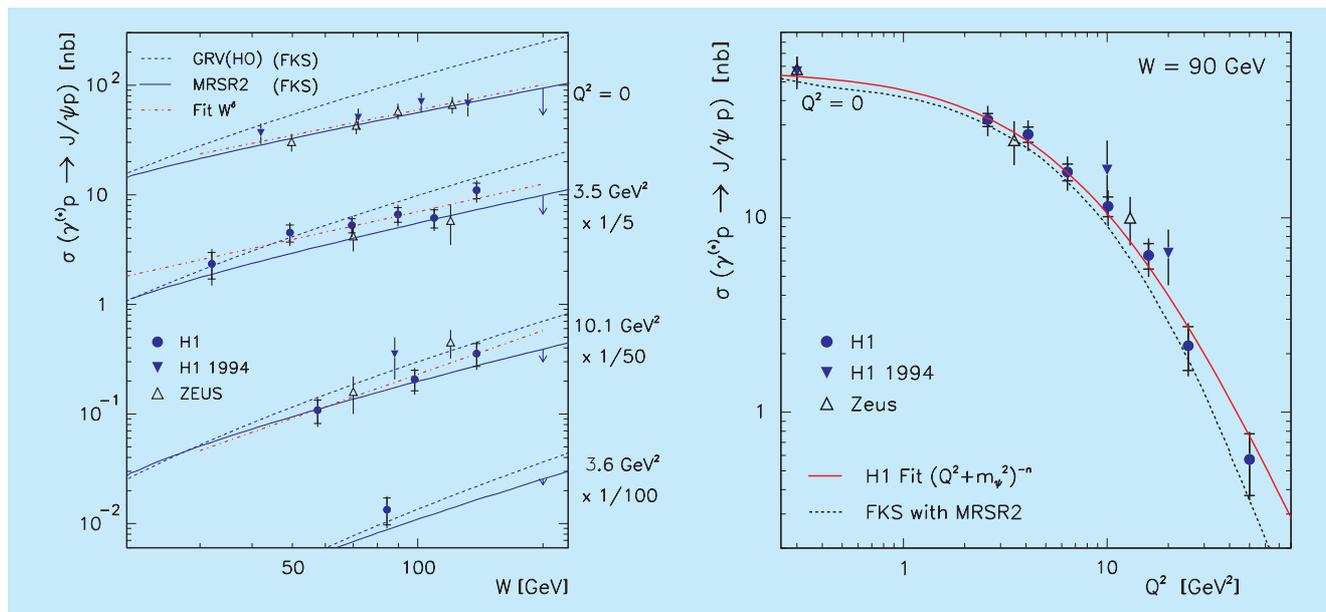


Abbildung 11: Der Wirkungsquerschnitt für elastische J/ψ -Produktion als Funktion der γp -Schwerpunktsenergie W (links) und der Photon-Virtualität Q^2 (rechts). Die eingezeichneten Kurven stellen einen Fit bzw. auf QCD basierende Modellvorhersagen dar.

zufriedenstellende Ergebnisse. Das J/ψ -Meson zeigt jedoch ein abweichendes Verhalten. Sein Wirkungsquerschnitt steigt deutlich schneller mit der Schwerpunktsenergie an als der der leichten Vektormesonen. Dies wurde als Anzeichen für einen harten Streuprozess gewertet, was theoretische Beschreibungen im Rahmen von QCD nahelegte. Hier wird der Erzeugungsprozess durch Austausch eines farbneutralen Systems von Gluonen beschrieben. Da die effektive Gluon-Dichte im Proton mit der Energie ansteigt, wächst der Wirkungsquerschnitt entsprechend. Dieser starke Anstieg ist in Abbildung 11 zu sehen. Er wird zufriedenstellend beschrieben von Modellen, die auf störungstheoretischer QCD beruhen.

Die unelastische Erzeugung von J/ψ ist ebenfalls gemessen und mit Vorhersagen, die im Rahmen der QCD gemacht werden, verglichen worden. Die Beschreibung der Daten durch diese theoretischen Ansätze ist nicht besonders erfolgreich. Dieser Prozess wurde oft als Testfall für die Behandlung der Farbe in QCD angesehen. Möglicherweise lässt sich mit Rechnungen in der nächsthöheren Ordnung eine bessere Beschreibung der Daten erreichen. Daran wird zur Zeit von Theoretikern gearbeitet.

Produktion von bottom-Quarks

Schwere Quarks werden bei HERA in „Photon-Gluon-Fusion“ erzeugt: ein Photon, emittiert vom einlaufenden Positron, und ein Gluon, emittiert vom Proton, verschmelzen und bilden dabei ein $c\bar{c}$ - oder ein $b\bar{b}$ -Paar. Wegen der sehr viel höheren Masse von bottom-Quarks relativ zu charm-Quarks ($m_b \sim 4.7 \text{ GeV}$, $m_c \sim 1.4 \text{ GeV}$) erwartet man, dass erstere sehr viel seltener erzeugt werden. Die höhere Masse der bottom-Quarks als inhärente Skala gibt andererseits Grund zur Annahme, dass theoretische Berechnungen der Erzeugungswirkungsquerschnitte, die im Rahmen der QCD durchgeführt werden, zuverlässiger sind.

Die H1-Kollaboration konnte 1999 die erste Messung der $b\bar{b}$ -Erzeugung bei HERA publizieren. Es wurde eine

klassische Methode benutzt: Das bottom-Quark zerfällt semileptonisch, was zu einem beobachteten Myon (10% der Fälle) und einem Teilchenjet führt. Wegen der hohen Masse des bottom-Quarks hat dieses Myon einen relativ hohen Transversalimpuls bezüglich der bottom-Flugrichtung. Dies erlaubt, bottom-Ereignisse von dem sehr viel häufigeren Untergrund von charm-Quarks und leichten Quarks abzutrennen. Leichte Quarks tragen zum Untergrund bei, da sie nach Hadronisation eine Myon-Signatur vortäuschen können, zum Beispiel durch den Zerfall geladener π -Mesonen. Durch Selektion von zwei Jets mit einer Energie von mehr als 6 GeV und eines Myons von mindestens 2 GeV konnte der Anteil von bottom-Quarks im Datensatz angereichert werden. Der gemessene Wert für den Wirkungsquerschnitt $\sigma(\gamma p \rightarrow b\bar{b}X)$ liegt knapp zwei Standardabweichungen über der theoretischen Erwartung (Abb. 12), die in nächstführender Ordnung berechnet ist.

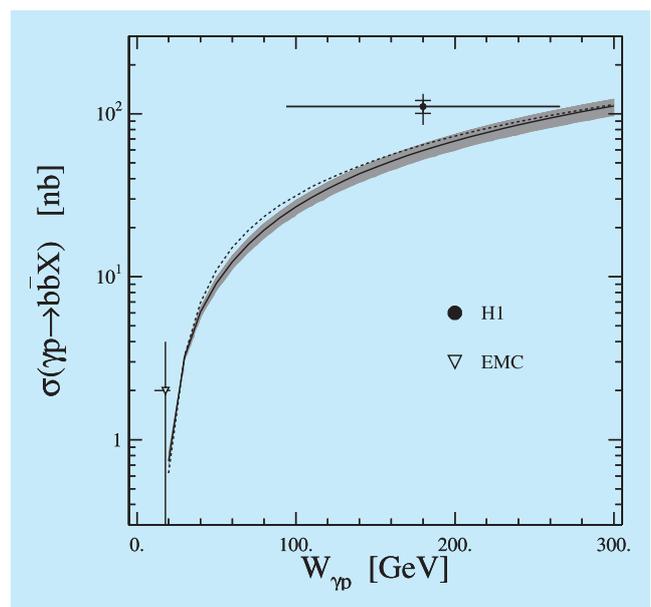


Abbildung 12: Der Wirkungsquerschnitt für inklusive Produktion von bottom-Quarks als Funktion der γp -Schwerpunktsenergie W . Die eingezeichneten Kurven basieren auf QCD-Vorhersagen mit verschiedenen Parametrisierungen der Proton-Strukturfunktion.