

Abbildung 18: Ein Ereignis der tiefinelastischen Positron-Proton Streuung im ZEUS-Detektor, dargestellt mit der neuen ZEUS Visualisierungssoftware ZeVis. Klar zu erkennen ist das gestreute Positron im zentralen Teil des Kalorimeters. Deutlich sind auch die Hits im Mikrovertexdetektor zu erkennen, die eine Rekonstruktion der Teilchenspuren bis dicht an den Wechselwirkungspunkt erlauben.

ZEUS-Experiment

Beteiligte Institute: Univ. of the Aegean, 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, Univ. Freiburg, Univ. Glasgow, DESY und Univ. Hamburg, 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, Ewha Womans Univ. Seoul, Univ.-GH Siegen, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. Toronto, 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 Wiederinbetriebnahme von HERA nach dem Umbau zur Luminositätserhöhung erwies sich als schwieriger als zunächst angenommen. Es gelang relativ schnell zu zeigen, dass das generelle Konzept des Umbaus erfolgreich ist und der Beschleuniger die geplante spezifische Luminosität erreicht. Allerdings ist der Strahlungsuntergrund im Detektor so groß, dass die Strahlströme weit unterhalb der Designwerte bleiben mussten, um eine Beschädigung des Detektors zu vermeiden. Ein großer Teil der Strahlzeit wurde zum Verständnis des Untergrundes aufgewendet. Bei ZEUS sind die Verschlechterung des Vakuums durch den Positronenstrahl sowie gestreute Synchrotronstrahlung für den Untergrund verantwortlich.

Die Resultate dieser Untersuchungen wurden von einem internationalen Komitee begutachtet und mündeten in der Empfehlung, im März 2003 den Strahlbetrieb zu unterbrechen, um die Absorber für Synchrotronstrahlung in der Wechselwirkungszone zu verbessern. Gleichzeitig sollen in HERA Verbesserungen am Vakuumsystem vorgenommen werden.

Seit Ende Oktober führte HERA einen routinemäßigen Datennahmebetrieb durch. Bis zum Ende des

Jahres wurde eine Luminosität von 2.2 pb^{-1} geliefert, von der ZEUS 1.4 pb^{-1} aufgezeichnet hat. Die Daten werden benutzt, um den neuen Mikrovertexdetektor zu testen und zu vermessen sowie um das Datennahmesystem zu testen.

Wissenschaftlich war der Berichtszeitraum sehr fruchtbar. Die ZEUS-Kollaboration hat 16 Veröffentlichungen mit den bis zum Herbst 2000 genommenen Daten verfasst. Einige der Resultate werden in diesem Bericht vorgestellt und diskutiert.

ZEUS Betrieb

Der Experimentierbetrieb bei ZEUS stand im Zeichen der Inbetriebnahme von HERA und ZEUS nach dem großen Umbau der Jahre 2000 und 2001. Es gelang schnell zu zeigen, dass der Beschleuniger den Designwert seiner spezifischen Luminosität von $1.7 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ erreicht. Damit wurde bewiesen, dass das Konzept der Luminositätserhöhung funktioniert. Allerdings stellte sich heraus, dass der Strahlungsuntergrund in den beiden Detektoren ZEUS und H1 unerwartet groß ist. Ein Betrieb bei hohen Strömen

und damit hoher Luminosität hätte zu einer Beschädigung der Detektoren geführt. Ein großer Teil der Strahlzeit des Berichtjahres wurde deshalb darauf verwendet, den Untergrund zu studieren. Drei Untergrundquellen wurden dabei gefunden:

- Synchrotronstrahlung,
- Positron-Restgas-Wechselwirkungen,
- Proton-Restgas-Wechselwirkungen.

Um hohe Luminosität zu erreichen, stehen bei HERA die letzten Magnete sehr dicht an der Wechselwirkungszone. Deshalb muss ein Teil der Synchrotronstrahlung durch die Wechselwirkungszone geführt werden. Sie wird größtenteils 11 m strahlabwärts in einem Septumabsorber absorbiert. Als Schutz gegen von dort rückgestreute Synchrotronstrahlung besitzt ZEUS ein System von drei Absorbern zwischen 0.8 m und 1.7 m. Es stellte sich heraus, dass vom innersten dieser Absorber Photonen, die am Septumabsorber reflektiert wurden, in die zentrale Spurkammer gestreut werden und dort zum Kammerstrom beitragen.

Weiter können Wechselwirkungen des Positronenstrahls mit Restgasmolekülen zu einem Energieverlust der gestreuten Positronen führen, die durch die HERA-Magnete von der Sollbahn abgelenkt werden und das zentrale ZEUS-Strahlrohr oder den ZEUS-Absorber treffen und dort anschauen. Teilchen aus diesen elektromagnetischen Schauern führen zu erhöhtem Strom in der zentralen Driftkammer.

Während des Luminositätsbetriebes wurde der Untergrund durch Protonenstrahl-Gas-Wechselwirkungen dominiert. Dabei führen die Synchrotronstrahlung vom Positronenstrahl sowie Hochfrequenzverluste zu einer erhöhten Desorptionsrate an getroffenen Oberflächen und verschlechtern dort lokal das Vakuum.

Die Untergrundbedingungen lassen sich durch folgende Maßnahmen soweit verbessern, dass ein Betrieb des ZEUS-Detektors bei den Designströmen möglich wird:

Der Synchrotronstrahlungsuntergrund, der die zentrale Kammer trifft, kann durch Änderung der drei ZEUS-Absorber um einen Faktor 10 reduziert werden. Eine spezielle Beschichtung des Septumabsorbers kann die rückgestreute Synchrotronstrahlung um einen Faktor 1.6 reduzieren.

Der Untergrund durch Positronenstrahl-Gas-Wechselwirkungen kann ebenfalls durch eine Änderung des innersten ZEUS-Absorbers sowie eine Verbesserung des HERA-Vakuumsystems verringert werden.

Die Verringerung des Untergrundes durch Protonenstrahl-Gas-Wechselwirkungen ist am schwierigsten und erfordert eine Vielzahl von Maßnahmen. Dazu gehören eine Verbesserung des Vakuumsystems in der Nähe der Wechselwirkungszone, eine Verschlinkung der ZEUS-Absorber, eine Reduktion der Hochfrequenzverluste und eine Verringerung der Rückstreuung von Synchrotronstrahlung am Septumabsorber.

Im November 2002 und im Januar 2003 hat eine internationale Expertenkommission die Ergebnisse der Studien und die Verbesserungsvorschläge begutachtet und dem Vorschlag zugestimmt, im März 2003 den Experimentierbetrieb zu unterbrechen, um die vorgeschlagenen Verbesserungen zu realisieren.

Seit dem 30. Oktober führt HERA einen routinemäßigen Datennahmebetrieb durch. Bis zum Ende des Jahres wurde eine Luminosität von 2.2 pb^{-1} geliefert, von der ZEUS 1.4 pb^{-1} aufgezeichnet hat. Wegen der beschriebenen Untergrundprobleme konnten nur bei etwa einem Viertel der aufgezeichneten Daten die innere Spurkammer und der Mikrovertexdetektor betrieben werden. Die Daten wurden benutzt, um die neuen Detektorkomponenten zu testen, zu eichen und zu vermessen.

Mikrovertexdetektor

Der Mikrovertexdetektor wurde im Jahr 1997 vom DESY PRC genehmigt und in der Folge entwickelt und gebaut. Während der Betriebsunterbrechung in den Jahren 2000/2001 wurde er im Innern des ZEUS-Detektors installiert.

Der gesamte Mikrovertexdetektor besteht aus dem zylindrischen Zentralteil mit drei Lagen Siliziumsensoren und einem Vorwärtsteil, bestehend aus vier radförmigen Sensorebenen, die senkrecht zur Strahlachse angeordnet sind. Der Detektor verfügt über etwa 200 000 Auslesekanäle.

Im Januar 2002 wurden erfolgreich etwa 2 Millionen kosmische Myon-Ereignisse aufgezeichnet, die in der

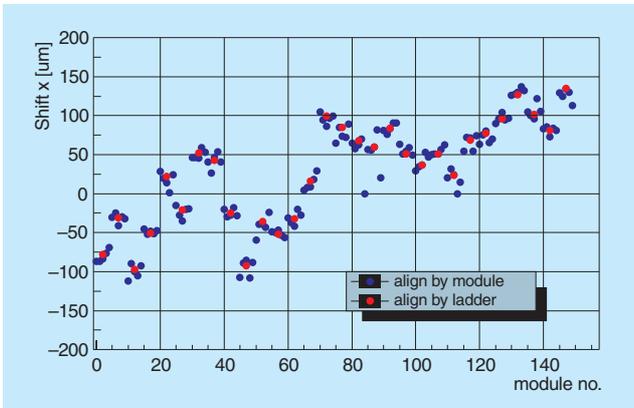


Abbildung 19: Die Abweichung vom Sollwert der x Position in μm für jedes Modul im Zentralbereich des ZEUS Mikrovertexdetektors.

Folge zur Vermessung der präzisen Lage des Detektors relativ zur zentralen Spurkammer und der Lage der einzelnen Sensoren im Zentralbereich des ZEUS-Detektors verwendet wurden. Abbildung 19 illustriert die Ergebnisse dieser Vermessung. Sie zeigt für jedes der 150 Module im Zentralbereich des Detektors die gemessenen Abweichungen vom Sollwert der x Position in μm .

Die maximalen gemessenen Abweichungen von der Sollgeometrie des Detektors betragen etwa $100\ \mu\text{m}$. Das bestätigt die hervorragende mechanische Präzision des Detektors.

Während der Datennahmepériode im Jahr 2002 war die Auslese des Mikrovertexdetektors routinemäßig in die Auslese des ZEUS-Experiments integriert. Unter Luminositätsbedingungen sind dabei mehr als 3 Millionen Elektron-Proton Ereignisse mit dem Mikrovertexdetektor aufgezeichnet worden.

Datenverarbeitung

Das Datennahmesystem hat sich unter realistischen Bedingungen bewährt und gezeigt, dass es auch hohe Raten bei geringer Totzeit verarbeiten kann. Ein 400 GByte DESY-Linux-Fileserver, der an das dCache-System angeschlossen ist, wird als Zwischenspeicher der Daten

eingesetzt, bevor sie von der ZEUS-Halle zum Rechenzentrum am DESY zur Weiterverarbeitung geschickt werden.

Die dritte Stufe des ZEUS-Triggers basiert auf einer Prozessorfarm und dient der endgültigen Auswahl und Klassifizierung der physikalischen Ereignisse. Sie wurde während des HERA-Umbaus auf eine Farm von Standard PCs umgestellt und ihre Software wurde in wesentlichen Teilen neu geschrieben. Die Datennahme hat gezeigt, dass diese Umstellung erfolgreich war und das neue System auch große Datenraten problemlos handhaben kann.

Die zentrale ZEUS-Analyseplattform ZARAH wurde mit 20 modernen Doppelprozessoreinheiten auf Basis des Intel Xeon erweitert, womit die Analysekapazität trotz gleichzeitiger Stilllegung älterer Systeme verdoppelt wurde. Das ZEUS Massenspeicherkonzept wurde auf das dCache-System umgestellt, wobei der als Cache von Magnetbanddateien verwendete Onlinespeicher unter Einsatz von RAID-Technologie auf 20 TB vergrößert wurde.

Die Produktion simulierter Ereignisse, welche bei ZEUS mittels des Funnel-Systems auf weltweit über 20 Rechnersysteme verteilt durchgeführt wird, erreichte mit 240 Millionen Ereignissen ein neues Rekordergebnis.

Im Zusammenhang mit der Inbetriebnahme der neuen Detektorkomponenten wurde auch eine neue Software zur graphischen Visualisierung von Ereignissen geschaffen. Das Programm ZeVis (Abb. 18) ist vollständig objekt-orientiert für den Client-Server Betrieb konzipiert und erlaubt den direkten Zugriff auf ZEUS-Ereignisse über das Internet.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtsjahr hat sich die ZEUS-Kollaboration auf die Veröffentlichungen weiterführender Physikanalysen der e^+p Daten der Jahre 1995–1997 (12 Publikationen) sowie der e^-p Daten der Jahre 1998–1999 (2 Publikationen) konzentriert. Insgesamt wurden 16 wissenschaftliche Arbeiten publiziert. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser interessanten Ergebnisse vorgestellt.

Mit Jets der Stärke der Farbkraft auf der Spur

Die präzise Vermessung der Struktur des Protons durch die beiden HERA-Experimente ZEUS und H1 hat maßgeblich zur weiteren Bestätigung der Quantenchromodynamik (QCD) als Theorie der starken Wechselwirkung beigetragen. Basierend auf dieser Theorie wandelte sich das eher statische, einfache Bild des Protons, bestehend aus drei unzerstörbaren Bausteinen, den Quarks, zu einem dynamischen Bild, je tiefer in das Proton hineingeschaut wurde. Die Quarks im Proton werden durch die Gluonen, die Träger der starken Kraft, nicht nur einfach zusammengehalten und garantieren so dessen Stabilität, sondern das Innere des Protons generiert sich dynamisch aus der steten Wechselwirkung der Farbladungen der Quarks und Gluonen (Partonen). Die Quantentheorie erlaubt es wiederum den Gluonen, sich kurzzeitig in Quark-Antiquark-Paare umzuwandeln oder sich in zwei Gluonen aufzuspalten. Die Stärke, mit der die Farbkraft zwischen den Partonen ausgetauscht wird, kann durch die starke Kopplungskonstante α_s charakterisiert werden. Die QCD sagt voraus, dass die Stärke der Farbkraft und damit die Größe von α_s empfindlich vom Abstand zwischen den Partonen abhängt. Für sehr kleine Abstände (große Skalen) hat diese Vorhersage die bemerkenswerte Konsequenz, dass die Partonen sich quasi wie freie Teilchen verhalten und die starke Kopplung sehr schwach wird.

Untersuchungen der Produktion von Teilchenbündeln (Jets) in hochenergetischen Teilchenkollisionen gehören zu den wichtigsten Methoden, die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen zu untersuchen. HERA, als einziger Speicherring hochenergetischer Elektronen- und Protonenstrahlen, bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, α_s mittels der Eigenschaften des hadronischen Endzustandes zu messen und die damit einhergehenden verschiedenen systematischen und Modell-Abhängigkeiten gegeneinander abzuwägen und so die Kenntnisse über die starke Kopplung deutlich zu erweitern. Im Berichtsjahr hat die ZEUS-Kollaboration mit vier Publikationen entscheidende Beiträge zu diesem Thema geliefert, von denen die drei wichtigsten Messungen hier diskutiert werden.

In dem einfachsten tiefunelastischen Elektron-Proton-(ep)-Streuprozess werden nach dem Austausch eines

virtuellen Photons im hadronischen Endzustand zwei Teilchenbündel (1+1 Jets) erzeugt, ein Jet folgt dem aus dem Proton herausgeschlagenen Quark und ein Jet formt sich aus den Resten des Protons. Tragen Gluonen zu der Produktion der Teilchenbündel bei, so kann sich im hadronischen Endzustand zusätzlich ein weiterer hochenergetischer Jet bilden (2+1). Theoretisch können solche Prozesse mit der QCD-Störungstheorie modelliert werden. In führender Ordnung α_s gehören dazu der QCD-Compton-Prozess, bei dem ein Gluon vom herausgeschlagenen Quark abgestrahlt wird und die Quelle für einen weiteren Jet bildet, sowie die Boson-Gluon-Fusion, in der das virtuelle Photon mit einem der Quarks eines Quark-Antiquark-Zustandes wechselwirkt, in den ein Gluon aus dem Proton fluktuiert ist.

Der Vergleich der 2+1 Jetrate oder Dijetrate zu der 1+1 Jetrate ist demzufolge empfindlich auf die Stärke der Kopplung α_s . Diese α_s -Messung, über die bereits im Jahr 2001 berichtet wurde, ist jedoch mit einer theoretischen Unsicherheit behaftet, die sich aus der Schwierigkeit einer eindeutigen Definition des Dijet-Streuquerschnitts für eine feste Ordnung in α_s ergibt. Diese Unsicherheit entfällt für inklusive Jet-Produktion, bei der alle Teilchenbündel aufsummiert werden.

Raten inklusiver hadronischer Reaktionen können für den Fall hoher Q^2 -Skalen oder hoher Transversalimpulse, oder wenn die Masse des erzeugten Teilchens groß ist, mit den Mitteln der störungstheoretischen QCD berechnet werden. Neue ZEUS-Messungen der inklusiven Jetproduktion in tiefunelastischer Streuung bei sehr hohen Q^2 -Skalen, $Q^2 > 500 \text{ GeV}^2$, oder hohen transversalen Jetenergien, $E_T^{\text{jet}} > 14 \text{ GeV}$, konnten eine gute Übereinstimmung des differentiellen Streuquerschnitts mit den QCD-Vorhersagen belegen.

Die hohe Qualität der Daten der Jahre 1996/97 mit einer integrierten Luminosität von 36 pb^{-1} gestattete es zudem, eine QCD-Anpassung des inklusiven Jet-Streuquerschnitts in Abhängigkeit von Q^2 und E_T^{jet} durchzuführen. Abbildung 20 zeigt die gemessene Skalenabhängigkeit von α_s , die den Erwartungen der QCD entspricht. Darüber hinaus wurde die Größe der starken Kopplungskonstanten α_s für $Q = M_Z$ (Masse des Z-Bosons) mit verbesserten systematischen Unsicherheiten bestimmt:

$$\alpha_s = 0.1212 \pm 0.0017(\text{stat})_{-0.0031}^{+0.0023}(\text{syst})_{-0.0027}^{+0.0028}(\text{th}).$$

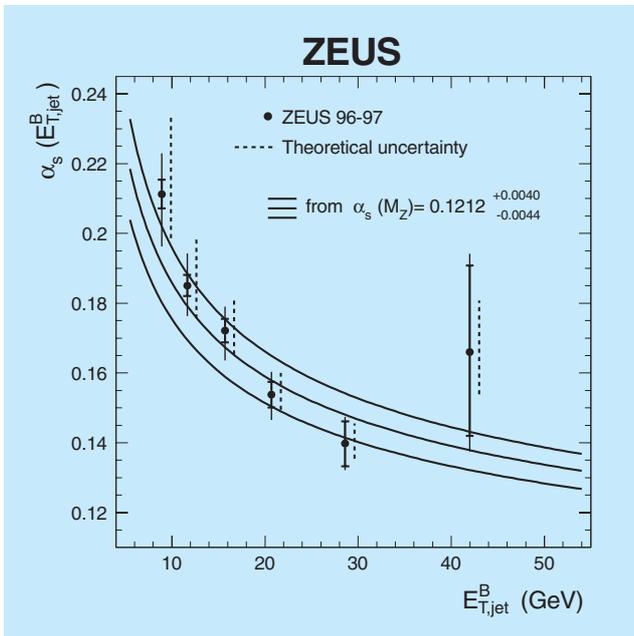


Abbildung 20: Abhängigkeit der Kopplungsstärke α_s von der E_T^{jet} Skala, bestimmt aus der QCD-Anpassung des differentiellen Jet-Wirkungsquerschnitts für $Q^2 > 500 \text{ GeV}^2$. Die gestrichelten Linien entsprechen der Modellunsicherheit.

Einen neuartigen Test der starken Wechselwirkung, der auf einer genauen Untersuchung der inneren Struktur der Jets basiert, hat die ZEUS-Kollaboration mit demselben Datensatz durchgeführt.

Im einfachsten Fall des Quark-Parton-Modells resultiert der Jet aus der Hadronisierung des herausgeschlagenen Partons, und der Jet weist keine innere Struktur in Form von Subjets auf. Die Anzahl der Subjets (Subjet-Multiplizität) ist eins. Allerdings kann die Abstrahlung von Gluonen mit niedrigem Transversalimpuls innerhalb des Jets zur Bildung von weiteren Subjets führen. Diese Emission von Partonen innerhalb des Jets ist wiederum proportional zur Kopplungskonstanten α_s . Die Abweichung der Subjet-Multiplizität von eins ist von der ZEUS-Kollaboration gemessen worden und in Abbildung 21 dargestellt. Für hohe transversale Jetenergien, $E_T^{\text{jet}} > 15 \text{ GeV}$, wird die gemessene Subjet-Multiplizität sehr gut von der QCD-Störungstheorie beschrieben und ermöglicht so eine alternative Be-

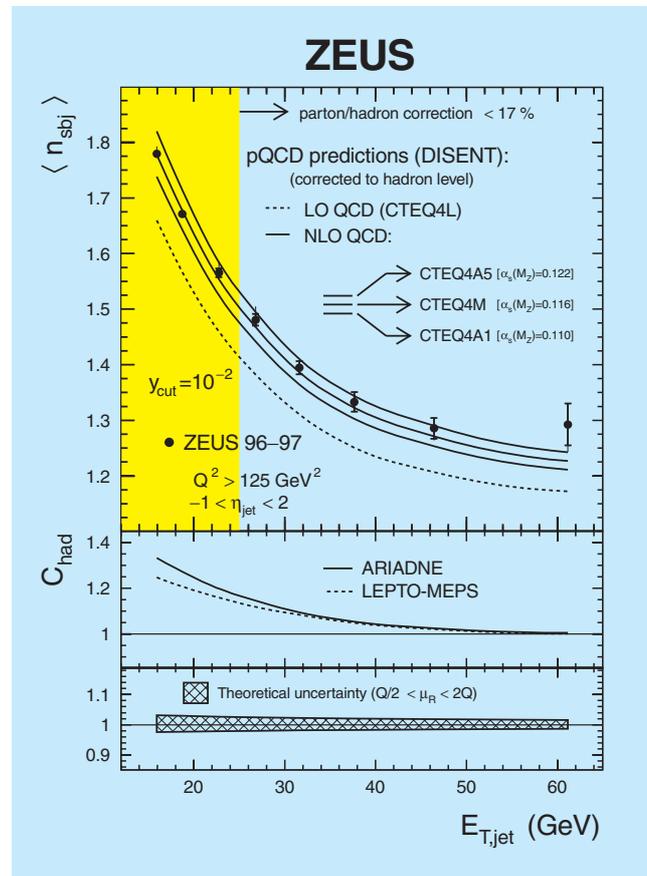


Abbildung 21: Die mittlere Anzahl $\langle n_{\text{sbj}} \rangle$ der Subjets innerhalb des Jets nimmt mit steigendem E_T^{jet} ab. Dies wird durch die QCD-Störungstheorie in der nächst höheren Entwicklung in α_s (NLO QCD) korrekt beschrieben.

stimmung von α_s , die unabhängig von der genauen Kenntnis der Impulsverteilungen der Partonen im Proton ist.

Die bisher beste statistische Genauigkeit für eine Messung von α_s bei ZEUS konnte basierend auf der hohen integrierten Luminosität von 82 pb^{-1} der Jahre 1998–2000 durch die QCD-Analyse inklusiver Jetproduktionsraten in Photoproduktion erfolgen. In der Photoproduktion werden fast reelle Photonen ($Q^2 \approx 10^{-3} \text{ GeV}^2$) im ep-Streuprozess ausgetauscht, wobei das Photon entweder indirekt mittels eines der Partonen seiner hadronischen Komponente oder direkt mit dem Quark im Proton wechselwirkt. Die für QCD-störungstheoretische Rechnungen notwendige harte Skala wird durch den Be-

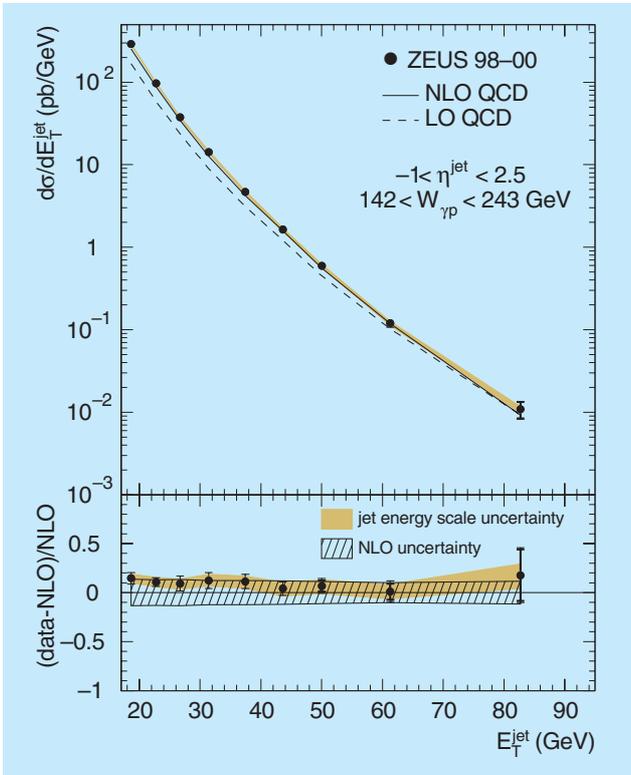


Abbildung 22: Der gemessene differentielle inklusive Jet-Streuquerschnitt zeigt einen starken Abfall mit steigender transversaler Jetenergie E_T^{jet} , der durch die QCD-Störungstheorie (NLO QCD) sehr gut vorhergesagt werden kann.

reich hoher transversaler Jet-Energien, $E_T^{\text{jet}} > 17 \text{ GeV}$, gewährleistet.

Die HERA-Schwerpunktsenergie von 318 GeV ermöglicht Messungen des inklusiven Jet-Streuquerschnitts über einen weiten Energiebereich von 142 GeV bis 293 GeV im Photon-Proton-Schwerpunktssystem. Komplementär zu den Jet-Streuquerschnittsmessungen in Proton-Antiproton-Kollisionen bei Schwerpunktsenergien bis zu 1800 GeV weisen diese ZEUS-Daten erstmalig die gute QCD-Beschreibung sowohl der Form als auch der Größe des gemessenen Jet-Streuquerschnitts in Photon-Proton-Wechselwirkungen nach, wie in Abbildung 22 dargestellt. Die QCD-Vorhersagen (NLO QCD) des inklusiven Jet-Streuquerschnitts beinhalten sowohl die Skalenabhängigkeit der Partondichteverteilungen des kollidierenden Hadrons als auch die Energieabhängigkeit der star-

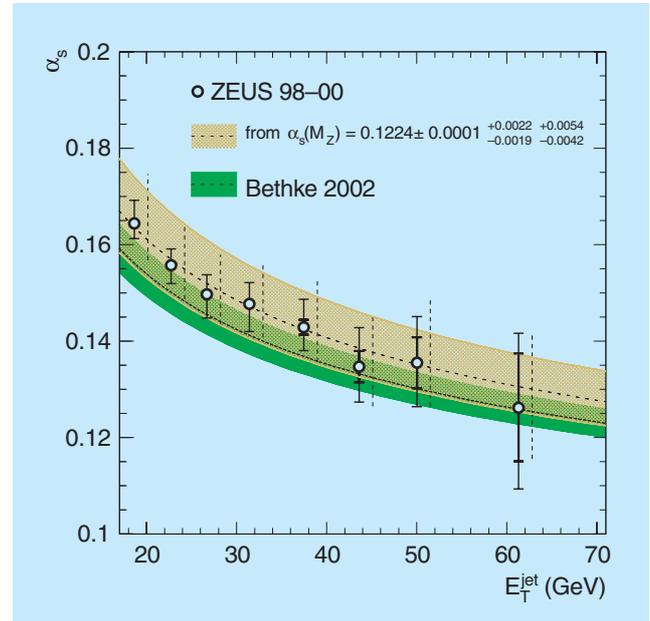


Abbildung 23: Die Genauigkeit der α_s -Messung in Photoproduktion ist dominiert durch die theoretischen Unsicherheiten (gestrichelte Linien) in der QCD-Beschreibung der Terme, die nicht in der nächstfolgenden Ordnung von α_s enthalten sind. Die Kurve „Bethke 2002“ entspricht dem Weltmittelwert für α_s .

ken Kopplungskonstanten. Eine QCD-Anpassung des in E_T^{jet} differentiellen Jet-Wirkungsquerschnitts liefert daher, ähnlich der in Abbildung 20 dargestellten Messung aus tiefinelastischer ep-Streuung, eine Bestimmung der starken Kopplungskonstanten α_s . Die Größe für α_s für die Skala $Q = M_Z$ sowie die Energieabhängigkeit von α_s sind in Abbildung 23 dargestellt. Ein Vergleich der Resultate der Abbildungen 20 und 23 verdeutlicht die verbesserte Präzision der vorgelegten Analyse von $\alpha_s(E_T^{\text{jet}})$ insbesondere für hohe transversale Jetenergien, $E_T^{\text{jet}} > 30 \text{ GeV}$. Die beobachtete Energieabhängigkeit von $\alpha_s^{-1}(E_T^{\text{jet}}) \propto \ln E_T^{\text{jet}}$ liefert gute Übereinstimmung mit der QCD-Vorhersage, dass im betrachteten E_T^{jet} -Bereich fünf Quarksorten (Flavours) aktiv beitragen.

Alle HERA-Resultate für α_s befinden sich in guter Übereinstimmung, sowohl untereinander als auch im Vergleich mit dem Weltmittelwert. Diese Übereinstimmung der mit verschiedenen Methoden gemessenen Werte von α_s ist ein empfindlicher Test der Theorie der starken Wechselwirkung.

Bestimmung der Impulsverteilungen der Partonen

Tiefunelastische Streuprozesse $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$ und die damit verbundene Bestimmung der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} können von allen HERA-Prozessen zur Zeit mit der besten Präzision sowohl gemessen als auch theoretisch beschrieben werden. Der starke Anstieg der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} , der bereits früh bei HERA entdeckt wurde, weist insbesondere auf die Zunahme der Gluondichte im Proton mit steigender Q^2 -Skala hin. Neue und exaktere ZEUS-Daten der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} , die bereits im Jahr 2001 vorgestellt wurden, erlauben einen genaueren Test der störungstheoretischen QCD nach dem DGLAP-Schema. Die Anpassung an die ZEUS-Daten erfolgt unter anderem zusammen mit Daten der Deuteron-Strukturfunktion von den Fixed Target Experimenten NMC und E665. Das ermöglicht eine bessere Trennung der u- und d-Quarks, jedoch nur für den kinematischen Bereich großer Protonimpulsanteile x und moderater Q^2 -Werte.

Die vorgelegte Analyse konnte nachweisen, dass die QCD-Störungstheorie die Abhängigkeit der Partondichte über fünf Größenordnungen von Q^2 vorhersagen kann, das heißt für Abstände zwischen den Partonen im Bereich von $1/1000$ bis zu $1/5$ des Protondurchmessers. Im Gegensatz dazu kann die QCD-Störungstheorie nicht vorhersagen, wie sich bei einer fest gewählten Q^2 -Skala die Dichte mit dem Anteil des Partons am Protonimpuls entwickelt. Diese Abhängigkeit kann nur basierend auf der Messung der x -Abhängigkeit der Strukturfunktion mit Hilfe von physikalischen Modellvorstellungen parametrisiert werden. Hierfür ist jedoch im Prinzip eine einzige Messung bei einem Q^2 -Wert völlig ausreichend, jede weitere Änderung der Skala kann durch die QCD-Störungstheorie berechnet werden.

Abbildung 24 gibt ein Beispiel für die x -Abhängigkeit der Partonverteilungen für den Fall des reinen Photon-Austausches bei einer Q^2 -Skala von 10 GeV^2 , was einer Auflösung von etwa $1/17$ des Protondurchmessers entspricht. Hierbei entsprechen kleinere x -Werte immer kleiner werdenden Anteilen vom Protonimpuls, die das Parton trägt. Eine Aufschlüsselung nach den einzelnen Partonsorten zeigt, dass sich im Bereich $x > 0.1$ der Protonimpuls im Wesentlichen zwischen den Rümpfen der u- und d-Quarks aufteilt. Die Eigenschaften dieser

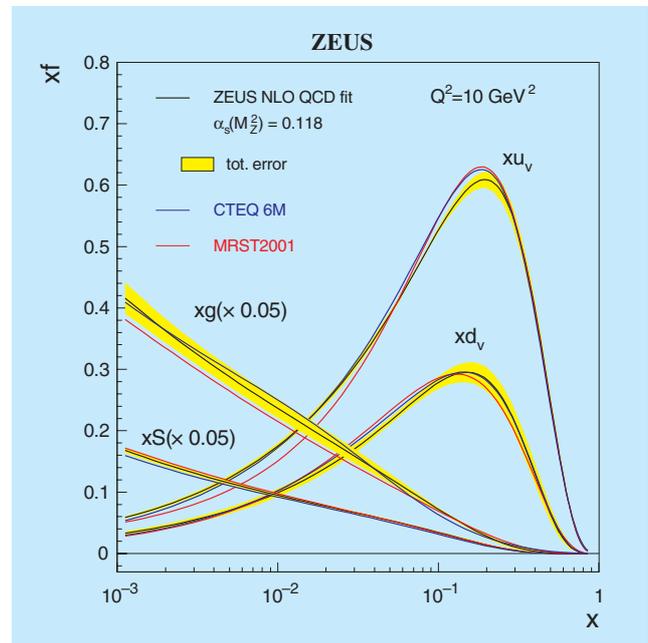


Abbildung 24: Impulsverteilungen der u- und d-Valenzquarks, der Seequarks und der Gluonen in Abhängigkeit vom Protonimpulsanteil x .

so genannten Valenzquarks (xu_v , xd_v) geben dem Proton unter anderem auch seine elektrische Ladung. Für Werte $x < 0.1$ nimmt die Neigung der Quarks rasch zu, Gluonen zu emittieren, die sich ihrerseits in Quark-Antiquark-Paare aufspalten können und so den Proton-See generieren. Infolge dieser Quark-Gluon-Dynamik der QCD verteilt sich der Protonimpuls auf immer mehr Partonen, insbesondere die Impulsverteilungen der Seequarks und der Gluonen wachsen stark an.

Die besondere Bedeutung der ZEUS-Daten liegt in der genauen Vermessung des starken Anwachsens der Impulsverteilungen der Seequarks und der Gluonen einschließlich der sorgfältigen Evaluation der Fehlerbänder, die als schattierte Flächen in Abbildung 24 eingezeichnet sind. Erst die genaue Kenntnis der Partonverteilungsfunktionen ermöglicht die Vorhersage hadronischer Reaktionen für neuartige Teilchenbeschleuniger, wie zum Beispiel den Large Hadron Collider (LHC) am CERN, und deren Entdeckungspotenziale.

Die Präzision der ZEUS F_2^{em} -Daten bei kleinen Protonimpulsanteilen, das heißt im Bereich sehr hoher Gluondichten, erlaubt es, gleichzeitig zur Form der

Partondichteverteilungen auch die Größe der starken Kopplung durch die QCD-Störungstheorie anzupassen. Unter besonderer Berücksichtigung der Fehlerkorrelationen ergibt sich für $Q = M_Z$ damit ein Wert von $\alpha_s = 0.1166 \pm 0.0008(\text{unkorr}) \pm 0.0032(\text{korr}) \pm 0.0032(\text{model})$.

Messung der Interferenz-Strukturfunktion xG_3

Für den Q^2 -Bereich kleiner als 100 GeV^2 wird der tief-unelastische $e^\pm p$ -Wirkungsquerschnitt fast ausschließlich durch das Wirken der elektromagnetischen Kraft über den Austausch eines virtuellen Photons dominiert, die eine direkte Messung der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} ermöglicht. Mit steigenden Impulsüberträgen werden jedoch mit etwa Q^2/M_Z^2 anwachsende Beiträge der schwachen Kraft erwartet.

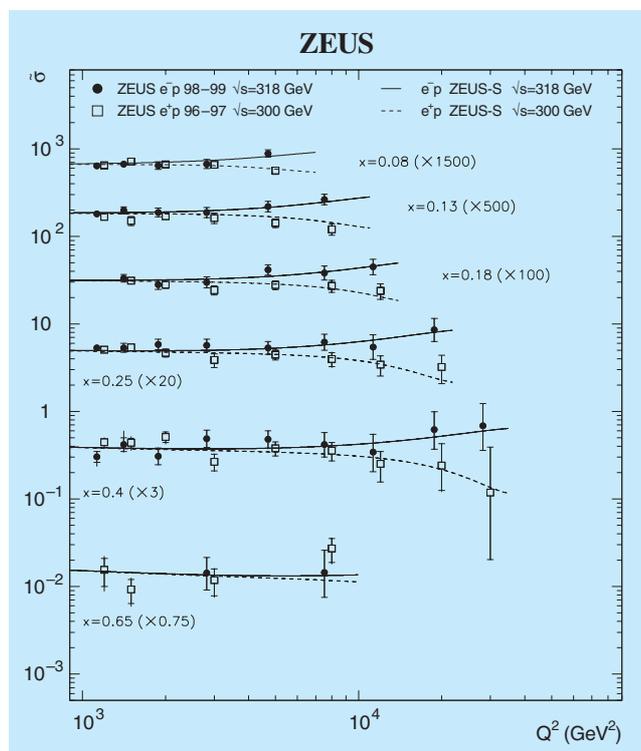


Abbildung 25: Für sehr hohe Q^2 -Skalen sind die ladungsabhängigen Beiträge der Photon-Z-Boson-Interferenz klar im unterschiedlichen Verhalten des reduzierten Streuquerschnitts der $e^\pm p$ -Streuung sichtbar.

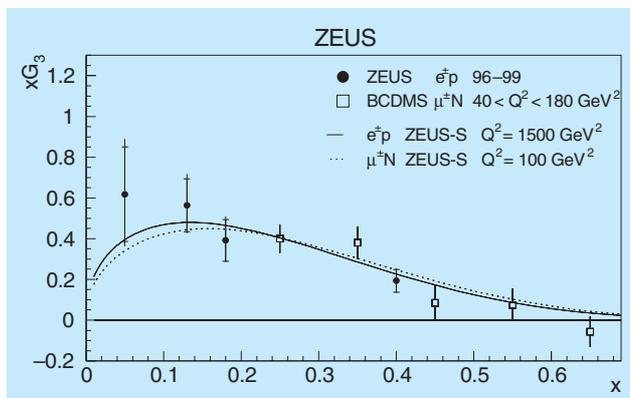


Abbildung 26: Die Interferenz-Strukturfunktion des Protons xG_3 misst bei den hier betrachteten Protonimpulsanteilen $x \geq 0.05$ im Wesentlichen die Summe der Impulsverteilungen der u - und d -Valenzquarks.

Während Beiträge durch einen reinen Z-Boson-Austausch bisher bei allen HERA-Messungen klein sind, konnten Änderungen im gemessenen $e^\pm p$ -Streuquerschnitt durch die Interferenz des Ein-Photon- und des Z-Boson-Austausches nachgewiesen und neue Kenntnisse über die Protonstruktur erhalten werden.

Die ZEUS-Kollaboration hat die Streuquerschnitte sowohl für Positron-Proton- als auch für Elektron-Proton-Streuung bei sehr hohen Q^2 -Skalen, $185 < Q^2 < 50\,000 \text{ GeV}^2$, bestimmt. Von besonderem Interesse sind hier die Elektronenstrahl-Daten der Jahre 1998–1999, die einer integrierten Luminosität von 16 pb^{-1} entsprechen.

Ein Vergleich der reduzierten (das heißt von kinematischen Abhängigkeiten bereinigten) Streuquerschnitte $\tilde{\sigma}$ der $e^\pm p$ -Streuung ist in Abbildung 25 dargestellt. Die hier beobachtete Abhängigkeit von der Ladung entspricht den Erwartungen des Standardmodells der Teilchenphysik. Für sehr hohe Q^2 -Skalen steigt der Streuquerschnitt für Elektron-Proton-Streuung an, sinkt jedoch für Positron-Proton-Streuung. Die Differenz der beiden Streuquerschnitte liefert neue Informationen über die Protonstruktur, die so genannte Interferenz-Strukturfunktion xG_3 . Die ZEUS-Messung von xG_3 wird in Abbildung 26 zusammen mit den xG_3 -Daten aus Myon-Kohlenstoff-Streuung (BCDMS) gezeigt. Im Vergleich zu den älteren Daten erweitert die ZEUS-Messung den kinematischen Bereich bis hin zu kleinen Protonimpulsanteilen $x = 0.05$.

Die Interferenz-Strukturfunktion xG_3 liefert im Wesentlichen Aussagen über die Differenz der Quark- und Antiquark-Verteilungen im Proton, die für die hier betrachteten recht großen Protonimpulsanteile die Verteilung der u- und d-Valenzquarks misst. Die in Abbildung 26 sichtbare nur schwache Abhängigkeit der Verteilung von der Q^2 -Skala liegt an der im Wesentlichen fehlenden Kopplung der Valenzquarks an die QCD-Dynamik der Gluonen. Dieses Verhalten kann sehr gut durch Standardmodell-Rechnungen unter Verwendung der bei ZEUS gemessenen Partondichteverteilungen beschrieben werden.

Mit dem Einbau von Spinrotatoren für HERA II eröffnen sich einmalige Möglichkeiten, hochenergetische Streuung am Proton mit longitudinal polarisierten Elektronen oder Positronen durchzuführen. In Abhängigkeit von der Ausrichtung der Elektronenpolarisation (mit oder entgegen der Strahlrichtung) werden vom Standardmodell dramatische Änderungen des ep-Wirkungsquerschnitts erwartet, die der Verletzung der Spiegelsymmetrie der schwachen Wechselwirkung folgen.

Streuprozesse mit geladenem Strom

In ep-Kollisionen bleibt das Elektron im Streuprozess erhalten, wenn das Austauscheteilchen neutral ist (Photon, Z-Boson). Im Fall eines ausgetauschten geladenen W^\pm -Bosons konvertiert das Elektron (Positron) in ein Neutrino (Anti-Neutrino), das sich im Endzustand nur durch das Fehlen von Energie nachweisen lässt. Da W-Bosonen wie ihre neutralen Verwandten, die Z-Bosonen, zu den Trägern der schwachen Kraft gehören, reagieren sie sehr unterschiedlich, je nachdem, ob sie mit einem Teilchen oder aber mit einem Anti-Teilchen wechselwirken. Dieses unsymmetrische Verhalten der W-Bosonen und die Bedingung, dass die Ladung im Streuprozess erhalten bleiben muss, ergeben die einzigartige Möglichkeit, spezifische Quarksorten einzeln zu untersuchen und empfindliche Tests des Standardmodells durchzuführen.

Die Elektronenstrahl-Daten der Jahre 1998–1999 analysierte die ZEUS-Kollaboration in Hinblick auf diese typische Ereignisklasse, $e^-p \rightarrow \nu_e X$. Die im Vergleich zu den Elektronenstrahl-Daten der Jahre 1995–1996 etwa zwanzigfache Datenmenge erlaubte wesentlich

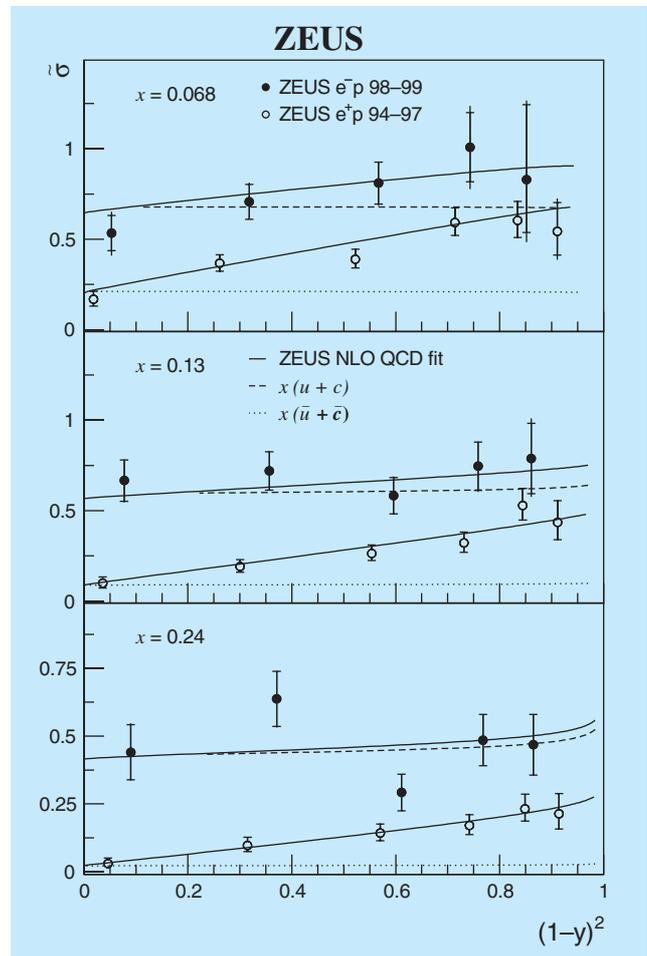


Abbildung 27: Für drei ausgewählte Protonimpulsanteile x wird die Entwicklung der reduzierten $e^\pm p$ -Streuquerschnitte in Abhängigkeit von der Variablen $(1-y)^2$ dargestellt. Die ZEUS-Daten können sehr gut durch die Erwartungen des Standardmodells unter Verwendung der bei ZEUS gemessenen Partondichteverteilungen beschrieben werden. Die $e^+ p$ -Daten wurden bereits im Jahr 2000 publiziert.

verbesserte Messungen der Abhängigkeiten des differentiellen Streuquerschnitts von der Q^2 -Skala, dem Protonimpulsanteil x und der Inelastizitäts-Variablen y , die ein Maß für die Energie des ausgetauschten Bosons ist.

Abbildung 27 zeigt die ZEUS-Messungen der reduzierten Wirkungsquerschnitte der durch den Austausch ei-

nes W-Bosons vermittelten tiefinelastischen Elektron-Proton- sowie Positron-Proton-Streuung. Diese Darstellung der von allen anderen bekannten Abhängigkeiten befreiten (reduzierten) Streuquerschnitte in Abhängigkeit von der Variablen $(1 - y)^2$ ist hierbei besonders geschickt, da fast direkt die Impulsverteilung bestimmter Quarksorten abgelesen werden kann. Für sehr kleine $(1 - y)$ -Werte (stark unelastischer Streuprozess und große Energie des W-Bosons) wird bei Verwendung des Elektronenstrahls die u-Quark-Verteilung und bei Verwendung des Positronenstrahls die Anti-u-Quark-Verteilung gemessen. Mit steigenden $(1 - y)$ -Werten wird durch die geringere Energie des W-Bosons der Streuprozess elastischer, und die Beiträge der Anti-d-Quarks für Elektronstreuung bzw. der d-Quarks für Positronstreuung nehmen sichtbar zu. Eine weitere Überprüfung dieses Verhaltens für fest gewählte Protonimpulsanteile x weist wiederum auf das Anwachsen der Partondichten hin; je kleiner x wird, umso mehr Partonen verteilt sich der Protonimpuls. Durch die Empfindlichkeit auf die einzelnen Anti-Quark-Verteilungen liefern diese Messungen komplementäre Informationen zu der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} , die die Summe von Quark- und Anti-Quark-Verteilungen misst.

Die ZEUS-Kollaboration führte eine Anpassung der Vorhersage der elektroschwachen Theorie an den in Q^2 differentiellen Wirkungsquerschnitt der e^-p -Daten durch, wobei die Masse des W-Bosons als einziger freier Parameter gewählt wurde. Trotz der geringeren Menge der e^-p -Daten im Vergleich zu den e^+p -Daten ist die W-Boson-Masse mit der vorgelegten Analyse mit verbesserter Genauigkeit bestimmt worden,

$$M_W = 80.3 \pm 2.1(\text{stat}) \pm 1.2(\text{syst}) \pm 1.0(\text{PDF}).$$

Die Ursache hierfür ist, dass der e^-p -Wechselwirkungsquerschnitt aufgrund der dominanten Streuung am u-Quark wesentlich größer als im Fall von e^+p ist und das Proton zudem aus zwei u-Quarks und nur einem d-Quark besteht. Des Weiteren ist die u-Quark-Verteilung des Protons bisher besser bekannt als die d-Quark-Verteilung und daraus resultierende Unsicherheiten (PDF) sind kleiner.

Die ZEUS-Resultate für die W-Boson-Masse befinden sich in guter Übereinstimmung mit den präziseren Werten aus e^+e^- -Streuxperimenten.

Suche nach spezifischen Quarksorten

Ein großer Teil der Wechselwirkungen bei HERA erfolgt über die Kollision eines vom Elektron oder Positron emittierten Photons mit einem der Bausteine des Protons. Dabei wird das Photon in der Regel als punktförmiges Teilchen betrachtet, während sich das Proton aus drei Valenzquarks (zwei u-Quarks und einem d-Quark) aufbaut, die durch den Austausch von Gluonen zusammengehalten werden. Gluonen können sich allerdings für kurze Zeiten in Quark-Antiquark-Paare aufspalten und auf diese Weise den so genannten Quark-See erzeugen. Die dafür benötigte Energie „borgen“ sie sich gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation aus. Diese Energie ist um so höher und die damit verbundene Zeitskala um so kürzer, je größer die Masse der bei der Aufspaltung produzierten Quarks ist. Am häufigsten spalten sich daher die Gluonen in Paare leichter Quarks auf ($u\bar{u}$ oder $d\bar{d}$ -Paare), die im Prinzip für viele Rechnungen als masselos angesehen werden können. Die Aufspaltung in Paare schwerer Quarks (c,b,t) ist dagegen relativ selten, kann jedoch aufgrund der großen Masse dieser Quarks im Rahmen der QCD-Störungstheorie beschrieben werden. Eine Sonderstellung nimmt die Aufspaltung in $s\bar{s}$ -Paare ein. Da das s-Quark etwa hundertmal schwerer ist als zum Beispiel das u-Quark, wird seine Paar-Fluktuationsrate bereits merkbar unterdrückt. Allerdings ist seine Masse noch nicht groß genug, um diese Fluktuationsrate direkt berechenbar zu machen. Das macht die Suche nach dem s-Quark so anspruchsvoll und spannend.

Die Genauigkeit der Messungen bei ZEUS erlaubt es, Paar-Fluktuationen im Proton getrennt nach spezifischen Quarksorten aufzulösen und insbesondere den noch wenig bekannten Beitrag der $s\bar{s}$ -Paare experimentell zu bestimmen. Dies geschieht zum Beispiel durch den Nachweis eines gebundenen $s\bar{s}$ -Paares, des ϕ -Mesons, im Endzustand des Streuprozesses. Die für die Messauflösung erforderliche kurze Zeitskala wird durch die Forderung nach der Wechselwirkung eines Photons mit hoher Virtualität (großem Q^2) garantiert. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, die ϕ -Mesonen, die s-Quarks aus dem Proton-See in sich tragen, von den ϕ -Mesonen zu unterscheiden, die erst später während der so genannten Fragmentation des Endzustandes entstehen. Um diesen Untergrund-Beitrag von ϕ -Mesonen abzuschätzen, bei denen keines der beiden s-Quarks aus dem Proton-See stammt, untersuchte die ZEUS-

Kollaboration auch die kinematischen Bereiche, zu denen Seequarks in der Regel nicht beitragen sollten. Die Messung in dem kinematischen Bereich, in dem es relativ wahrscheinlich ist, dass mindestens eines der beiden s-Quarks aus dem ursprünglichen Proton-See stammt, zeigt, dass $s\bar{s}$ -Paare mit einer Rate zum Quark-See beitragen, die mit unserem derzeitigen Wissen über das s-Quark kompatibel ist. Der ZEUS-Kollaboration gelang damit der erste direkte Nachweis bei HERA, dass im Proton-See s-Quarks existieren.

Quark-Antiquark-Paare können nicht nur bei der Aufspaltung eines Gluons, sondern ebenfalls durch die Fluktuation des an der Wechselwirkung teilnehmenden Photons entstehen. In einem besonders interessanten Spezialfall stabilisiert sich das normalerweise nur kurzlebige Quark-Antiquark-Paar durch den Austausch eines so genannten Pomerons mit dem Proton und formt einen gebundenen neutralen Meson-Zustand, der durch seine Zerfallsprodukte identifiziert werden kann. Diese Zerfallsprodukte erscheinen im Detektor räumlich deutlich getrennt von anderen Teilchenbündeln des Endzustandes und liefern daher eine besonders einfache Signatur. Die Masse und der Zerfallsmodus des Mesons erlauben dabei Rückschlüsse auf die Quarksorte, die bei der ursprünglichen Photon-Fluktuation erzeugt worden ist. Die ZEUS-Kollaboration untersuchte, basierend auf der integrierten Luminosität von 25 pb^{-1} der Jahre 1995–1996, insbesondere Ereignisse, bei denen ρ ($u\bar{u}$, $d\bar{d}$), ϕ ($s\bar{s}$) oder J/ψ ($c\bar{c}$) Mesonen erzeugt werden. Diese so genannten Vektormesonen können von ihren Quantenzahlen her im Prinzip als schwere Verwandte des Photons betrachtet werden. Die ZEUS-Messungen konnten einen ersten Hinweis erbringen, dass bei der Produktion von Vektormesonen unter großen Winkeln zur Strahlachse eine harte Skala existiert, die diese Prozesse im Rahmen der QCD-Störungstheorie berechenbar macht. Diese Skala wird durch hohe Werte der Variablen $-t$ geliefert, wobei $-t$ den quadrierten Impulsübertrag vom Proton zum Protonrest beschreibt.

Abbildung 28 zeigt die gute Übereinstimmung der ZEUS-Messungen in allen drei Fällen mit den QCD-Vorhersagen. Dies ist sowohl ein Test des zugrunde liegenden QCD-Modells für den Pomeron-Austausch, als auch der Fluktuationswahrscheinlichkeit des Photons in die jeweilige Quarksorte.

Mesonen mit schwereren Quarks, wie das J/ψ -Meson, nehmen unter den Vektormesonen eine Sonderstellung

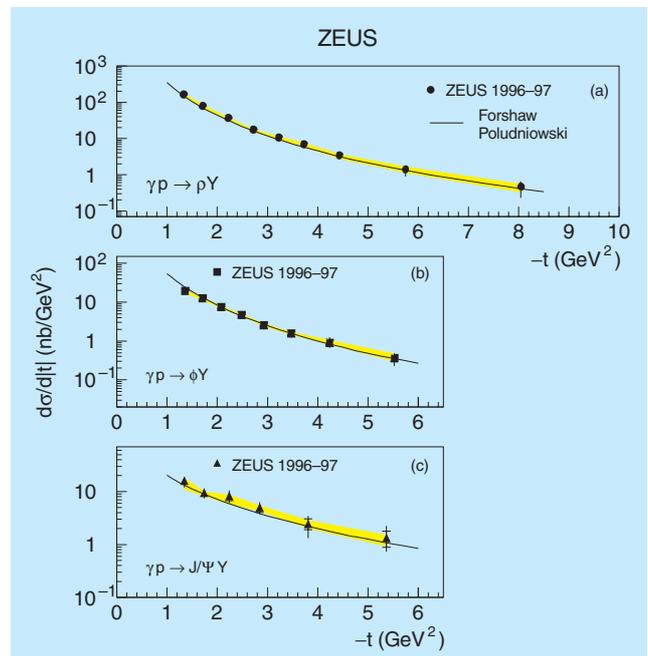


Abbildung 28: Die differentiellen Streuquerschnitte für die Vektormeson-Produktion von (a) ρ , (b) ϕ und (c) J/ψ als Funktion von $-t$ können gut durch Rechnungen der QCD-Störungstheorie (Linien) modelliert werden.

ein, da zum Beispiel die große c-Quark-Masse auch dann eine harte Skala garantiert, wenn die Streuung nicht unter großen Winkeln erfolgt. Die Untersuchung der J/ψ -Produktionsrate konnte daher auf alle entsprechenden Ereignisse ohne Winkeleinschränkung erweitert werden. Diese ZEUS-Messung ist in Abbildung 29 dargestellt. Der starke Anstieg der J/ψ -Produktion mit wachsender Schwerpunktsenergie des Proton-Photon-Systems kann als ein Maß für die Zunahme der Anzahl der Gluonen im Proton verstanden werden, die zum Pomeron-Austausch beitragen.

Eine ähnliche Untersuchung kann mit Ereignissen der so genannten offenen charm-Produktion durchgeführt werden, bei der das Photon in einen ungebundenen $c\bar{c}$ -Paar Zustand fluktuiert. Die Forderung nach einem Pomeron-Austausch, das heißt deutliche räumliche Trennung von den produzierten Teilchenbündeln, soll dabei aufrechterhalten bleiben. Die c-Quarks fragmentieren dann oft in D^* -Mesonen, die aufgrund ihrer Zerfallscharakteristik gut nachgewiesen werden können. Zur Festlegung einer kurzen Zeitskala wird eine große Q^2 -Skala gefordert. Die ZEUS-Messung des D^* -

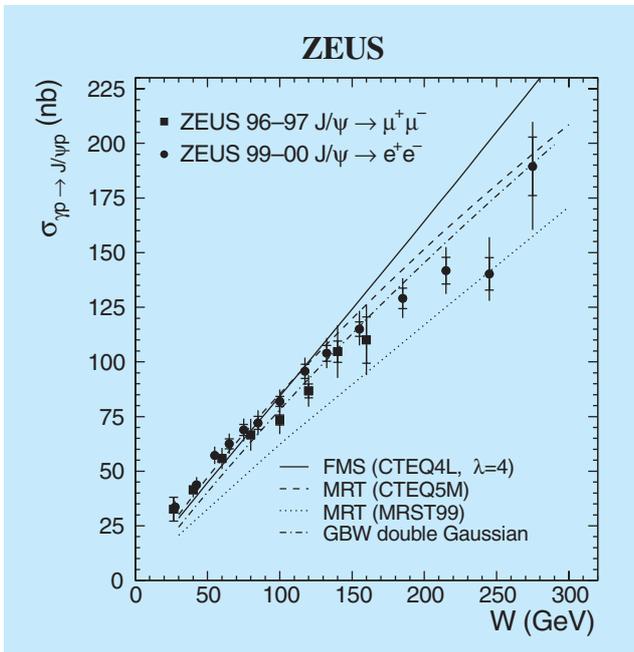


Abbildung 29: Wirkungsquerschnitt der J/ψ -Produktion in Abhängigkeit von der Photon-Proton-Schwerpunktsenergie W . Neben den ZEUS-Daten sind auch mehrere QCD-Vorhersagen (Kurven) dargestellt.

Wirkungsquerschnitts als Funktion verschiedener kinematischer Variablen erlaubte wiederum die Messung des Gluon-Beitrags zum Pomeron-Austausch, oder alternativ den Test von Modellen, in denen dieser Austausch durch QCD-Fluktuationen im Photon parametrisiert wird. Die vorhandenen Daten werden durch QCD-inspirierte Modelle am besten beschrieben.

Auch die inklusive Produktion schwerer Quarks ohne die Forderung nach einem Pomeron-austausch ist als Test der QCD sehr interessant, da die Quarkmasse hier in jedem Fall eine brauchbare harte Skala liefert. Hierzu wurde von der ZEUS-Kollaboration insbesondere die unelastische Produktion von J/ψ und ψ' -Mesonen in Photoproduktion untersucht.

Die Produktionsrate und der Anteil der Energie des J/ψ -Teilchens an der Gesamtenergie der Wechselwirkung hängen empfindlich davon ab, ob der farblose gebundene $c\bar{c}$ -Zustand direkt aus der harten Wechselwirkung hervorgeht („Colour Singlet“) oder zunächst ein farbhafter Zwischenzustand entsteht, der erst durch Fragmentation in den farblosen gebundenen Zustand über-

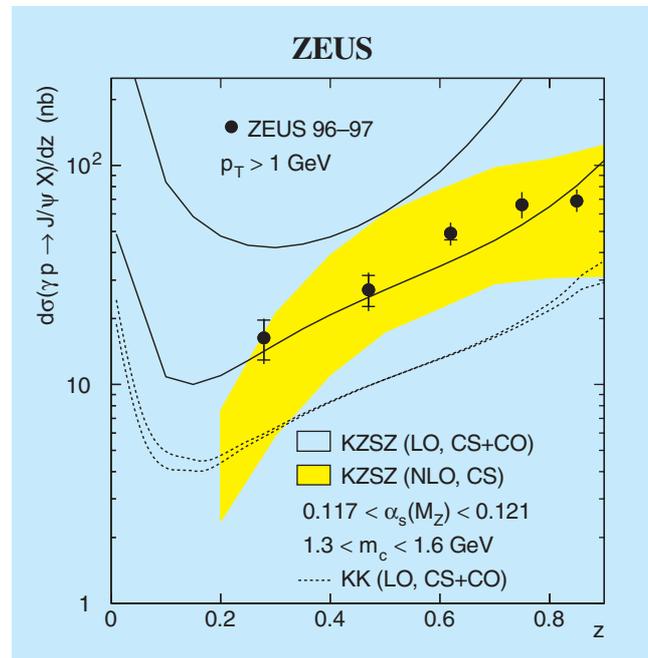


Abbildung 30: Wirkungsquerschnitt für die inklusive Produktion von J/ψ -Mesonen in Photon-Proton-Kollisionen als Funktion von z , dem Anteil des J/ψ an der vom Photon übertragenen Gesamtenergie. Ebenfalls dargestellt sind die Vorhersagen zweier „Colour Octet“ Modelle in führender Ordnung (LO, CS+CO), und die Vorhersage eines „Colour Singlet“ Modells in nächstführender Ordnung (NLO, CS) der QCD-Störungstheorie.

geht („Colour Octet“). Die ZEUS-Daten deuten darauf hin, dass der „Colour Singlet“ Beitrag allein bereits ausreicht, um die gemessenen Ereignisverteilungen zu erklären (Abb. 30).

Ein altes Modell in neuem Licht

Während die QCD-Störungstheorie sehr erfolgreich das Verhalten der Partonen für kurze Abstände, gemessen in Bruchteilen des Protondurchmessers, beschreiben kann, ist es bisher nicht möglich, das langreichweitige Wirken der starken Kraft auf Skalen des Protondurchmessers exakt mathematisch zu formulieren. Prozesse wie die Produktion von stark vorwärts-gestreuten, energiereichen Protonen und Neutronen können hier entscheidende Hinweise auf den Zusammenhang zwischen

lang- und kurzreichweitigen Korrelationen zwischen den Partonen liefern.

Die ZEUS-Kollaboration hat die semi-inklusive Neutron-Produktion, $ep \rightarrow eXn$, mit den Positronenstrahl-Daten der Jahre 1995–1997 untersucht, wobei das gestreute Neutron mit Hilfe des Vorwärts-Neutronkalorimeters (FNC) nachgewiesen wurde. Die im Streuprozess erzeugten energiereichen Neutronen haben nur einen sehr kleinen Transversalimpuls, der mit langreichweitigen Parton-Wechselwirkungen korreliert ist. Diese kann man sich mit Hilfe eines alten, vor der Entdeckung der Quarks entwickelten Modells veranschaulichen, in dem das Proton als von einer Wolke aus leichten Mesonen, vor allem Pionen, umgeben betrachtet wird. In einer speziellen Version dieses Modells besteht das Proton „im Kern“ aus einem Neutron, das in eine Wolke aus Pionen gehüllt ist. Gelingt es, nach dem ep -Streuprozess das Neutron nachzuweisen, das streng der Richtung des einfallenden Protonenstrahls folgt (Vorwärts-Richtung), so ist das ein indirekter Hinweis auf eine Wechselwirkung des HERA-Positrons mit den Pionen aus der Pionwolke. Diesen Zusammenhang nutzend, hat die ZEUS-Kollaboration die partonische Struktur des Pions untersucht. Trotz des indirekten Zugangs sind solche Studien sehr wichtig, da direkte hochenergetische Positron (Elektron) Pion-Streuxperimente bisher nicht durchführbar sind.

Die ZEUS-Messung der Strukturfunktion des Pions erfolgte im Rahmen des Ein-Pion-Austauschmodells, das die direkte Neutron-Produktion bei HERA gut beschreibt. Die Strukturfunktion des Pions zeigt bemerkenswerte Ähnlichkeiten in ihren kinematischen Abhängigkeiten mit der Strukturfunktion des Protons. Diese Beobachtung wird in Abbildung 31 veranschaulicht.

Die ZEUS-Daten können die Form der Pion-Strukturfunktion insbesondere für kleine Anteile des Pions am Protonimpuls, $x < 0.01$, weiter einschränken und belegen, dass Pion und Proton im Wesentlichen dieselbe Zusammensetzung aus Quark-Antiquark-Paaren haben.

Die Produktion eines energiereichen Protons in Protonenstrahlrichtung in der Reaktion $e^+p \rightarrow e^+Xp$ hat die ZEUS-Kollaboration mit den Daten der Jahre

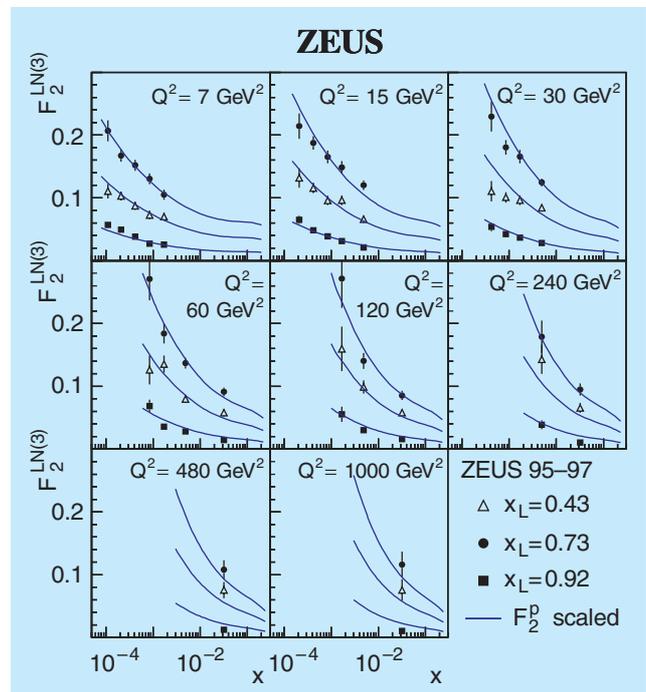


Abbildung 31: Die Struktur des Pions kann im Wesentlichen durch die Quark- und Antiquark-Verteilungen des Protons beschrieben werden, wenn diese entsprechend skaliert werden (Kurven). Die Variable x_L beschreibt den Anteil am Protonimpuls, der im Streuprozess auf das Neutron übertragen wird.

1994–1995 untersucht. Der Impulsanteil des gestreuten Protons x_L wurde hierbei mit dem Vorwärts-Protonenspektrometer (LPS) bestimmt. Die ZEUS-Messung zeigt, dass in etwa 13% der Positron-Proton-Kollisionen das gestreute Proton 3–40% seiner ursprünglichen Energie verloren hat. Bemerkenswert ist insbesondere die Beobachtung, dass der Anteil stark vorwärts gestreuter Protonen im Wesentlichen unabhängig ist von der Härte des Streuprozesses und damit von den Eigenschaften des ausgetauschten Photons. Die ZEUS-Daten ergänzen damit ähnliche Messungen in Proton-Proton-Kollisionen.

Im Prinzip können auch diese Daten Auskunft über die Zusammensetzung der Mesonwolke geben, die das Proton umgibt. Dieser Prozess ist jedoch wesentlich schwerer zu modellieren, da Beiträge von Pionen gering sind und im Wesentlichen die nicht-pionische Struktur der Mesonwolke getestet wird.