

Abbildung 21: Der geöffnete ZEUS-Detektor. Der gesamte Vorwärtsdetektor ist über das Strahlrohr nach vorne herausgezogen.

ZEUS-Experiment

Beteiligte Institute: Univ. of the Aegean Chios, Inst. Phys. Technol. Almaty, NIKHEF und Univ. Amsterdam, ANL Argonne, Humboldt Univ. Berlin, Andrews Univ. Berrien Springs, Univ. und INFN Bologna, Univ. Bonn, Univ. Bristol, RAL Chilton, Ohio State Univ. Columbus, Univ. della Calabria und INFN Cosenza, Inst. of Nucl. Physics und Jagellonian Univ. Cracow, AGH 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. Cathol. de Louvain, Univ. of Wisconsin Madison, Univ. Autónoma Madrid, McGill Univ. Montreal, Engin. Phys. Inst. und State Univ. Moscow, MPI München, 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, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Inst. of Technol. Tokyo, Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. del Piemonte Orientale Novara, Univ. Toronto, KEK Tsukuba, Pennsylvania State Univ. University Park, Inst. for Nucl. Stud. und Univ. Warschau, Meiji Gakuin Univ. Yokohama, DESY Zeuthen.

Specher: R. Yoshida, Argonne Natl. Lab., USA

Das Jahr 2005 war sowohl für HERA als auch ZEUS das bisher erfolgreichste. Von Anfang Januar bis Mitte November wurde HERA mit Elektronen betrieben und hat eine integrierte Luminosität von etwa 200 pb^{-1} geliefert von denen ZEUS etwa 150 pb^{-1} aufgezeichnet hat. Damit hat ZEUS in einem Jahr mehr Daten aufgezeichnet als in der gesamten Zeit vor dem Luminositätsupgrade. Ab etwa Ende Februar war das Vakuum in der Wechselwirkungszone Nord so weit konditioniert, dass HERA keine Beschränkungen des Strahlstromes mehr beachten musste. In der Folge wurde HERA regelmäßig mit Strömen von etwa 90 mA Protonen und 40 mA Elektronen betrieben. Die spezifische Luminosität lag mit mehr als $2 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ deutlich über den Designwerten.

Die Einstellung der Polarisation des Elektronenstrahls erwies sich als schwieriger als erwartet. Es gelang erst im Sommer nach langen und intensiven Studien regelmäßige Polarisationswerte von mehr als 35% zu erreichen.

Ab Mitte November begann eine etwa 3-monatige Betriebsunterbrechung, die bei ZEUS hauptsächlich zur Verbesserung der Kühlung im Bereich des Vorwärtsdetektors benutzt wurde. Daneben wurden Reparatur- und Wartungsarbeiten an verschiedenen Komponenten des Detektors vorgenommen.

Im Berichtsjahr hat die ZEUS Kollaboration neun Analysen mit Daten veröffentlicht, die bis zum Jahr 2000 genommen wurden. Im Zentrum des Interesses stehen aber immer mehr die Daten, die seit 2003 genommen wurden. Das Verständnis des Mikrovertexdetektors und der Daten mit polarisierten Leptonen ist inzwischen soweit fortgeschritten, dass ZEUS im Sommer fünf Analysen mit Daten von HERA II auf den großen Konferenzen vorgestellt hat. Einige dieser Analysen werden in diesem Bericht vorgestellt. Anfang 2006 ist mit der ersten Publikation von Wirkungsquerschnitten mit polarisierten Leptonen zu rechnen.

ZEUS Betrieb

HERA lieferte von Anfang Januar bis Mitte November regelmäßig Luminosität mit Elektronen. Da in der Wartungsperiode im Herbst des Jahres 2004 Arbeiten an der Wechselwirkungszone von H1 vorgenommen worden waren, dauerte es bis Ende Februar bis das Vakuum dort soweit konditioniert war, dass HERA ohne Beschränkung des Strahlstromes betrieben werden konnte. Von da an wurde HERA routinemäßig mit etwa 40 mA Elektronen und 90 mA Protonen gefüllt. Eine weitere Steigerung des Elektronstromes, obwohl im Prinzip möglich, führte zu häufigen Ausfällen verschiedener Komponenten und wurde im Interesse eines effizienten Betriebes nach einigen Versuchen aufgegeben. Die spezifische Luminosität lag mit mehr als $2 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ deutlich über den Designwerten. Damit konnte HERA häufig mehr als 1 pb^{-1} pro Tag liefern. An den besten Tagen hat ZEUS mehr als 1 pb^{-1} pro Tag aufgezeichnet, dies sind die höchsten Luminositäten in der Geschichte von HERA.

Die Untergrundbedingungen waren im ersten Drittel der Runperiode sehr wechselnd und durch häufige Spitzen im Protonuntergrund dominiert. Nach einigen Untersuchungen gelang es, einen Protodipol nahe der ZEUS Wechselwirkungszone als Auslöser der Spitzen zu identifizieren. Dieser Magnettyp war schon vorher an anderen Stellen durch undichte innere Kühlleitungen aufgefallen. Nach dem Wechsel der beiden Spulen dieses Magneten verbesserten sich die Untergrundbedingungen bei ZEUS signifikant. Bis zum Ende der Runperiode gab es keine weiteren Ausfälle dieses Magnettyps. In der folgenden Wartungsperiode wurden, wie bereits seit längerem geplant, alle Spulen dieses Typs ausgetauscht.

Die Einstellung der Polarisierung der Elektronen erwies sich als unerwartet schwierig. Beim Positronbetrieb im Jahr 2004 waren nach relativ kurzer Zeit Polarisierungen von 40% erreicht worden. Mit Elektronen waren zunächst Polarisationswerte von kaum 30% zu erreichen. Zur Untergrund- und Luminositäts-

messung wird HERA auch immer mit einigen nicht kollidierenden Strahlpaketen gefüllt. Die nicht kollidierenden Elektronen zeigten die erwartete deutlich höhere Polarisierung. Dies wies auf starke depolarisierende Strahl-Strahleffekte hin. Der Versuch HERA an einem anderem Arbeitspunkt mit deutlich veränderten Tunewerten zu betreiben, wurde nach wenigen Wochen wieder aufgegeben, da die Polarisierung zwar auf Werte um 40% erhöht werden konnte, dies aber mit einer um über 20% geringeren Luminosität erkauft wurde. Durch langwieriges und aufwändiges Adjustieren aller Parameter ist es schließlich gelungen regelmäßig Polarisationswerte von etwa 35% zu erreichen.

Mitte November begann die letzte große Wartungsperiode von HERA. Das Hauptziel für ZEUS war die Verbesserung der Kühlung im Bereich des Vorwärtsdetektors. Im Berichtsjahr konnte der Straw-Tube-Tracker des Vorwärtsdetektors nicht eingeschaltet werden, da mangelnde Kühlung einen zuverlässigen Betrieb des benachbarten supraleitenden Solenoiden unmöglich gemacht hat. Wichtigste Nebenbedingung dieser Reparatur war, dass das Strahlvakuum nicht gebrochen werden sollte. Deshalb wurde der gesamte Vorwärtsdetektor bei eingebautem Strahlrohr entlang des Strahls über den letzten HERA Magneten gezogen, um Zugang zum Solenoiden zu bekommen. Der äußere Tank des Solenoiden wurde im Bereich des Vorwärtsdetektors mit einer Wasserkühlung versehen. Außerdem wurden im Vorwärtsbereich die Schrauben ersetzt, die den äußeren Vakuumtank des Solenoiden zusammenhalten. Tests nach dem Zusammenbau des Detektors zeigten, dass Solenoid und Vorwärtsdetektor jetzt problemlos zusammen betrieben werden können. Daneben wurden an vielen Detektorcomponenten Reparatur- und Wartungsarbeiten vorgenommen. Ziel war dabei den Detektor so vorzubereiten, dass er in der letzten Betriebsperiode Daten mit höchster Qualität aufzeichnen kann. Diese Betriebsperiode ist mit 16 Monaten außergewöhnlich lang und es kann erwartet werden, dass der bei weitem größte Teil aller HERA Daten während dieser Zeit geliefert werden wird.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde HERA erstmals seit langer Zeit wieder mit Elektronen betrieben. Dabei wurde schnell eine Datenmenge erreicht, die die Größe des bisherigen e^-p -Datensatzes aus den Jahren 1998/99 bei weitem übertrifft. Dank der guten Leistung der Maschine wurde mit mehr als 140 Millionen Ereignissen der bislang umfangreichste Datensatz eines einzelnen Jahres aufgezeichnet. Neben der gesteigerten Luminosität bieten sich der Physikanalyse im HERA II-Run fundamental neue Möglichkeiten. Dazu gehört vor allem die Nutzung der Polarisierung der Elektron- und Positronstrahlen für das Studium der elektroschwachen Kopplung. Weiter sind die erheblichen Erweiterungen des Spurdetektorsystems bei ZEUS für die Physik mit schweren Quarks von großer Bedeutung. Darüberhinaus erreichen auch etliche Analysen der HERA I-Daten nun ihren optimalen Reifegrad und demonstrieren die einzigartige Reichweite des HERA-Programms.

Spinstruktur der schwachen Wechselwirkung

Die Spin-Struktur der Kopplung des geladenen schwachen Stroms (oft bezeichnet mit CC, für *charged current*) gehört zu den Eckpfeilern der von Glashow, Salam und Weinberg entwickelten Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung. Bei einer $e^\pm p$ -Wechselwirkung spricht man von einem geladenen Strom, wenn das Elektron oder Positron ein geladenes W-Boson abstrahlt, welches seinerseits mit einem Quark des Protons wechselwirkt, dabei geht das Lepton selbst in ein Neutrino- oder Antineutrino über. Dieser Prozess ist im Kern eine Umkehrung des Beta-Zerfalls unter kontrollierten Bedingungen. Dabei spielt die Spinorientierung des Leptons eine große Rolle, man spricht von rechtshändigen oder linkshändigen Teilchen je nachdem ob der Spin in Bewegungsrichtung oder entgegengesetzt zeigt. Das Standardmodell sagt voraus, dass nur linkshändige Elektronen und rechtshändige Positronen an ein W-Boson koppeln können.

Da HERA II über die einzigartige Möglichkeit verfügt, polarisierte Elektronen- und Positronenstrahlen mit

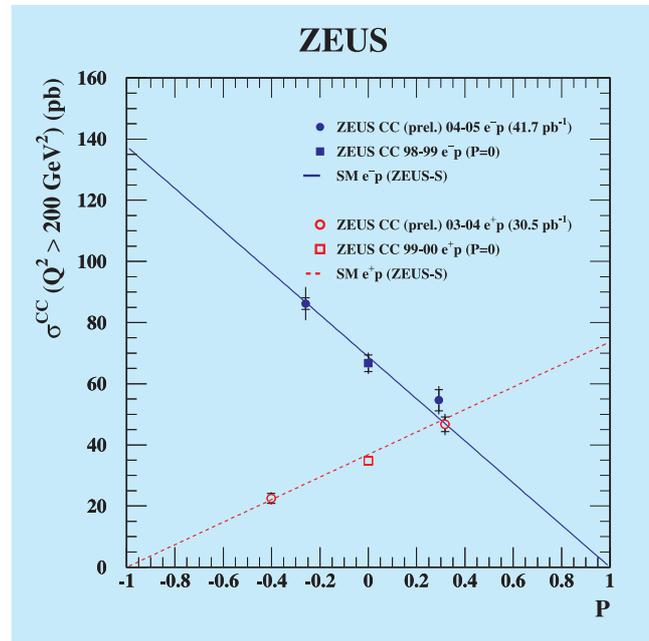


Abbildung 22: Totaler Wirkungsquerschnitt für Wechselwirkungen des geladenen Stroms in der tiefinelastischen e^-p -Streuung in Abhängigkeit vom mittleren Polarisationsgrad der Elektronen (gefüllte Symbole), im Vergleich mit der Vorhersage der elektroschwachen Theorie (durchgezogene Linie). Auch die entsprechende Messung für e^+p -Streuung ist gezeigt (offene Symbole, gestrichelte Linie).

Protonen zur Kollision zu bringen, kann diese elementare Eigenschaft des Standardmodells direkt überprüft werden. Nach der Messung mit polarisierten Positronen konnte im Berichtszeitraum nun auch der CC-Wirkungsquerschnitt für polarisierte Elektronen gemessen werden, wobei Polarisationsgrade von $+29\%$ und -26% erreicht wurden. Zusätzlich verwendet man auch die bei HERA I gemachten Messungen mit unpolarisierten Leptonen ($P = 0$). Ein vorläufiges Ergebnis ist in Abbildung 22 dargestellt. Sie zeigt den CC-Wirkungsquerschnitt für e^-p -Streuung (gefüllte Symbole). In der Extrapolation ist deutlich zu erkennen, dass der Wirkungsquerschnitt für linkshändige Elektronen ($P = -1$) maximal ist, während er für rechtshändige Elektronen ($P = +1$) im Rahmen der Genauigkeit verschwindet. Die entsprechende Messung für Positronen aus dem Run 2003/04 ist zum Vergleich ebenfalls

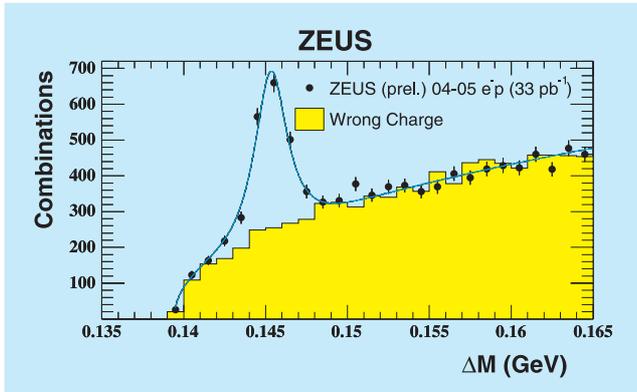


Abbildung 23: Invariantes Massenspektrum der $D^0\pi^+$ -Kandidaten relativ zur rekonstruierten D^0 -Masse in den HERA II e^-p -Daten (durchgezogene Linie). Die schattierte Fläche entspricht der Abschätzung des kombinatorischen Untergrundes unter Verwendung von Ladungskombinationen, die nicht zum Zerfall passen.

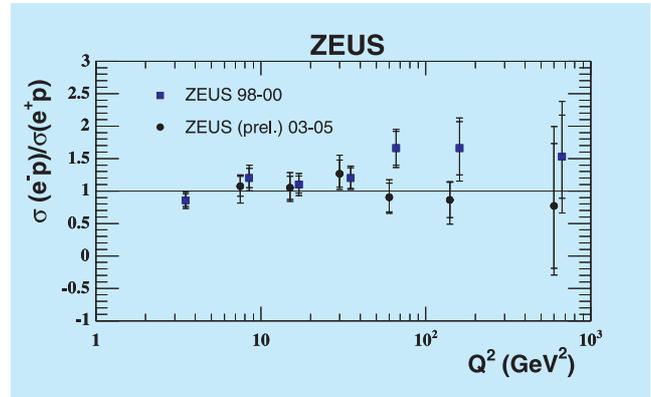


Abbildung 24: Verhältnis der D^* Produktionswirkungsquerschnitte in der tiefinelastischen e^-p - und e^+p -Streuung. Die gefüllten Kreise zeigen das vorläufige Ergebnis aus den HERA II-Daten, die gefüllten Rechtecke das frühere Resultat aus der HERA I-Periode.

gezeigt, sie weist wie in der Theorie erwartet den umgekehrten Trend auf, das Standardmodell wird also in eindrucksvoller Weise bestätigt. Mit der laufenden Datennahme wird die statistische Genauigkeit dieser Messung weiter verbessert werden, so dass auch gezielt nach subtileren Abweichungen vom Standardmodell gesucht werden kann.

Charm-Production in den HERA II-Daten

Charm-Produktion macht bei hohen Werten des Impulsübertrags Q^2 bis zu 30% des totalen Wirkungsquerschnitts aus. Nach unserem heutigen Verständnis wird Charm in ep -Kollisionen hauptsächlich durch den Boson-Gluon-Fusionsmechanismus erzeugt, ein Prozess dessen Häufigkeit nicht von der Ladung des Leptons abhängt. Dennoch schien in einer früheren ZEUS-Messung die Rate von $D^*(2010)^+$ -Mesonen, welche eine klassische Manifestation von Charm darstellen, in Elektron-induzierten Ereignissen systematisch höher zu sein, und zwar um bis zu zwei Drittel bei hohen Q^2 . Allerdings war der mit HERA I genommene e^-p -Datensatz zu klein, um das Vorhandensein einer echten Anomalie zu erhärten oder zu widerlegen. Die-

ser offenen Frage aus HERA I-Zeiten konnte nun mit den neuen Elektron-Daten nachgegangen werden.

Bereits mit den ersten 33 pb^{-1} der HERA II e^-p -Daten stand im Vergleich mit der alten Messung ein rund doppelt so großer Datensatz zur Verfügung. Das unter Verwendung des Vertexdetektors bestimmte invariante Massenspektrum (Abbildung 23) zeigt ein klares Signal der D^* -Resonanz, aus dem sich die Produktionsrate zuverlässig bestimmen lässt. Abbildung 24 zeigt das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte $\sigma(e^-p)/\sigma(e^+p)$ für die D^* -Produktion sowohl für die alte als auch für die neue Messung. Man sieht, dass die auf deutlich mehr Statistik beruhende HERA II-Messung sehr gut mit einem einheitlichen Produktionsmechanismus verträglich ist. Die frühere Anomalie ist daher als statistische Fluktuation einzustufen.

Die Handschrift der QCD: Multijets

Im Jahre 1979 wurde in e^+e^- -induzierten Drei-Jet-Ereignissen bei DESY am Speicherring PETRA das Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung, das Gluon, erstmals direkt nachgewiesen und damit ein wesentlicher Grundstein zur experimentellen Etablierung

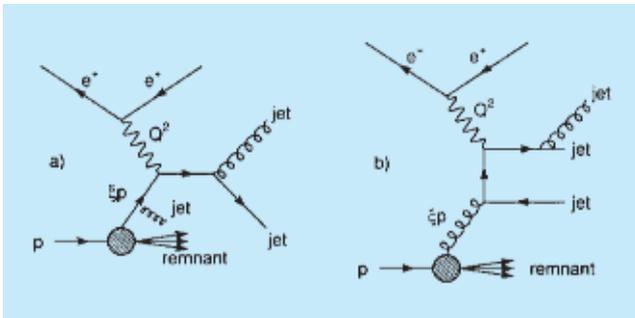


Abbildung 25: Feynmandiagramme zweier Elementarprozesse, die zur Produktion von Endzuständen mit drei Jets führen.

der Quantenchromodynamik (QCD) gelegt. Ein modernes HERA-Äquivalent dieser historischen Messung ist die Beobachtung von Multijet-Ereignissen, bei denen neben dem Jet des gestreuten Partons ein oder mehrere weitere Jets beobachtet werden. In beiden Fällen sieht man die QCD gewissermaßen direkt bei der Arbeit, in Kontrast zu ihrem subtileren Wirken in der Skalenbrechung der Strukturfunktionen.

Die starke Wechselwirkung erlaubt es nicht, einzelne Quarks oder Gluonen aus ihren Hadronen vollständig herauszulösen und frei zu beobachten. Stattdessen entsteht beim Herausschlagen eines Partons aus dem Proton ein ganzer Schauer neuer Teilchen, den man als Jet bezeichnet. In ihren Eigenschaften spiegeln Jets jedoch die Richtung und Energie der originären Partonen wider, und erlauben daher die Rekonstruktion der elementaren Wechselwirkung auf Parton-Niveau.

Bei der tiefunelastischen Elektron-Proton-Streuung entsteht neben den Überresten des Protons im gewöhnlichen Fall nur ein Jet, der vom gestreuten Quark herrührt. Komplexere Endzustände mit zwei Jets sind durch Boson-Gluon-Fusionsprozesse oder durch die QCD-Version des Comptoneffekt denkbar, drei Jets können durch Abstrahlung eines weiteren harten Gluons entstehen, wie in Abbildung 25 gezeigt. Da diese Dijet- und Trijet-Prozesse in der Störungstheorie unterschiedlichen Ordnungen der starken Kopplungskonstanten entsprechen, lassen sich hierbei die entsprechenden Matrixelemente der elektroschwachen und starken Wechselwirkung direkt testen. Darüber hin-

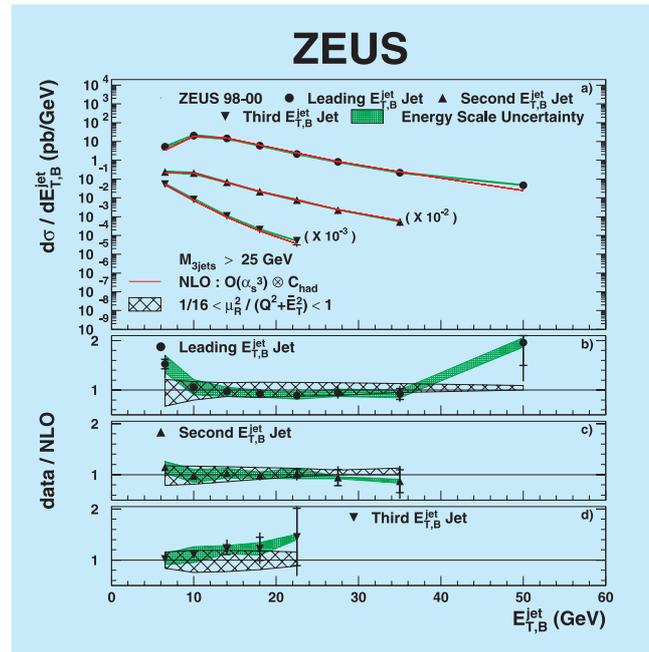


Abbildung 26: Inklusiver Wirkungsquerschnitt der Trijet-Produktion als Funktion der transversalen Energien der Jets (a), im Vergleich mit der Modellvorhersage (b–d).

aus kann aus dem Verhältnis der Jetraten α_s selbst mit relativ geringen Unsicherheiten bestimmt werden.

Der differentielle Wirkungsquerschnitt der Trijet-Produktion ist in Abbildung 26 gezeigt. Die drei Jets sind hierbei absteigend nach ihrer transversalen Energie geordnet, was den Abfall der Raten zu kleinen E_T für die ersten beiden Jets erklärt. Die Vorhersagen der QCD in der Ordnung α_s^3 liefern eine recht gute Beschreibung der Daten.

In Abbildung 27 ist die relative Rate der Trijet- zur Dijet-Produktion gezeigt, die mit Q^2 abnimmt. Dieser Abfall spiegelt die Skalenabhängigkeit der starken Kopplungskonstante wider, auf die wir im übernächsten Abschnitt noch einmal zurückkommen werden. Die überlagerten Modellkurven für verschiedene Werte von $\alpha_s(M_Z)$ zeigen sehr deutlich, wie eine stärkere Kopplung auch zu einer höheren Rate von Trijet-Ereignissen führt.

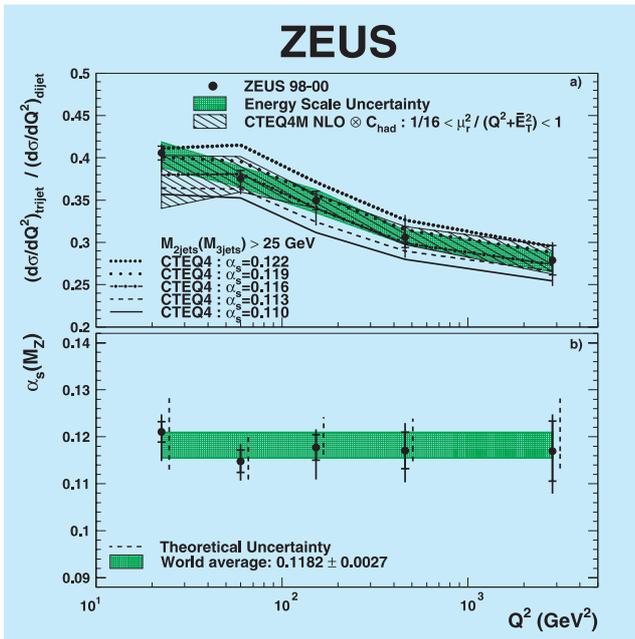


Abbildung 27: (a) Verhältnis der Wirkungsquerschnitte von Trijet- zu Dijet-Produktion, im Vergleich mit Modellvorhersagen zu verschiedenen Werten von $\alpha_s(M_Z)$. (b) Extraktion der starken Kopplungskonstanten (bezogen auf die Skala M_Z) aus jedem Datenpunkt.

QCD-Analyse der Wirkungsquerschnitte von inklusiven und Jet-Daten

Ein fundamentales Ziel des HERA-Forschungsprogramms ist die präzise Vermessung der Struktur des Protons, welches nach unseren heutigen Erkenntnissen aus einem dynamischen Bindungszustand von Quarks und Gluonen aufgebaut ist. Im Quark-Parton-Modell werden die Quantenzahlen des Protons vor allem durch seine drei Valenzquarks, zwei u-Quarks und ein d-Quark, bestimmt, die den überwiegenden Teil seines Impulses tragen. Neben den Valenzquarks spielen aber auch Gluonen, die Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung, sowie ein See aus weiteren Quarks und Antiquarks eine wichtige Rolle, die im dynamischen Gleichgewicht des Bindungszustands des Protons laufend neu erzeugt und wieder absorbiert werden. Die Valenzquarks und See-Quarks im Proton nehmen direkt an der elektroschwachen Wechselwirkung teil,

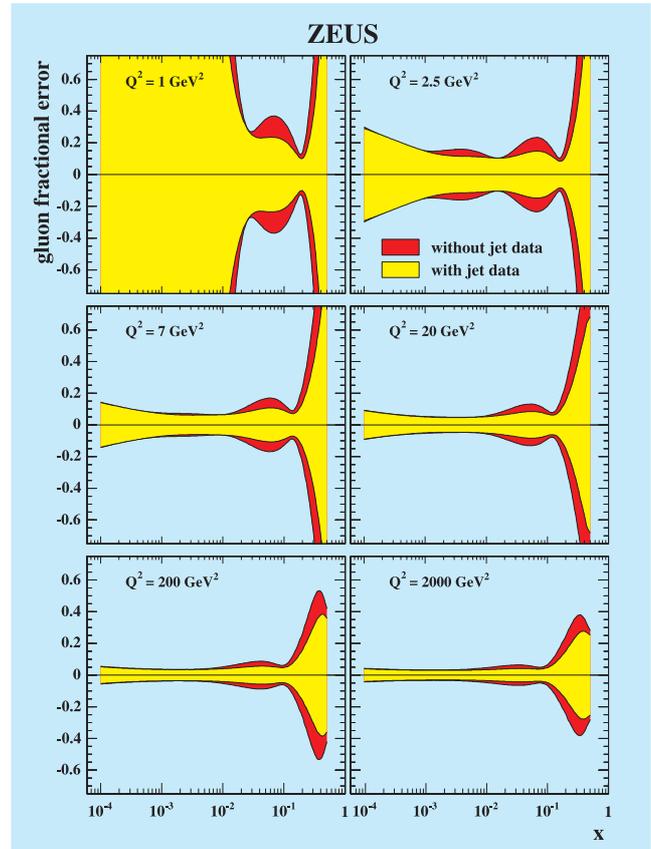


Abbildung 28: Experimentelle Unsicherheit der Bestimmung der Gluon-Verteilung für verschiedene Werte von Q^2 . Die erhebliche Verbesserung der Genauigkeit durch Einbeziehung der Jet-Ereignisse (hell) gegenüber rein inklusiven Messungen (dunkel) ist vor allem bei mittleren und hohen x -Werten offensichtlich.

so dass ihre Verteilungsfunktionen in inklusiven tiefunelastischen Streuprozessen (DIS) unmittelbar gemessen werden können. Die Gluonen im Proton sind dagegen wesentlich schwerer aufzuspüren, denn sie tragen nur indirekt zu diesen Streuprozessen bei. Es war daher bislang üblich, HERA-Daten mit Resultaten anderer Experimente, etwa Messungen der Jet-Produktion am Tevatron des Fermilab, zu kombinieren, um ein vollständiges Bild zu erhalten. Diese Daten sind jedoch zum Teil mit erheblichen systematischen Unsicherheiten behaftet, die die Kombination erschweren. Das Ziel ist daher, all diese Strukturfunktionen in einem einzigen Experiment zu bestimmen. Das ZEUS-Experiment

hat daher eine simultane Analyse sowohl inklusiver DIS als auch Jet-Daten durchgeführt, die die genannten Probleme vermeidet. Die Wirkungsquerschnitte der Jet-Produktion sind sensitiv auf die Gluon-Verteilung im mittleren und höheren x -Bereich, wie in Abbildung 28 dargestellt, so dass alle Partonverteilungen durch einen einzigen simultanen Fit bestimmt werden können. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt, wobei sich die Charakteristika der relativ harten Valenzquarkverteilungen, xu_v und xd_v , klar von den weicheren Verteilungen der Gluonen (xg) und See-Quarks (xS) abheben.

Da die Produktion von Jets bei hohen Impulsüberträgen durch den QCD-Compton-Prozess dominiert ist, kann unter Einbeziehung der Jet-Daten auch die starke Kopplungskonstante α_s bestimmt werden. In Abbildung 30 ist die charakteristische Variable für die Qualität des Fits, χ^2 , gezeigt, wobei der Ort des χ^2 -Minimums den

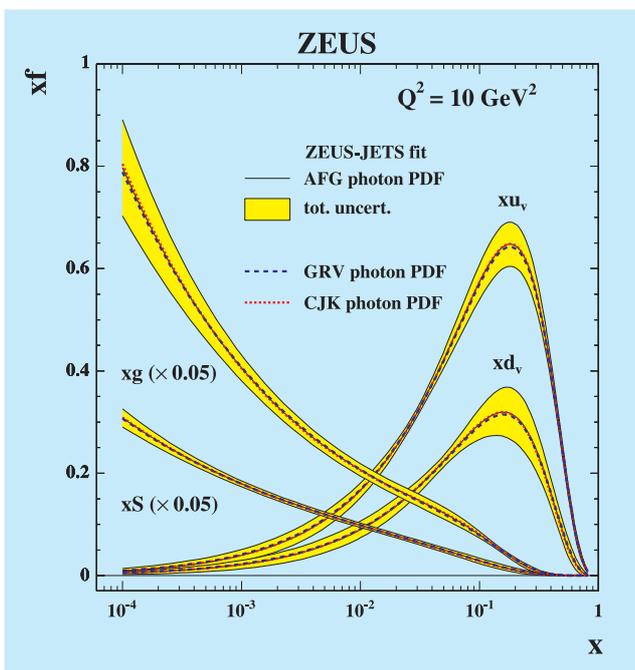


Abbildung 29: Parton-Verteilungen für die u- und d-Valenzquarks des Protons, sowie für Gluonen und See-Quarks. Die verschiedenen Linien innerhalb des schattierten Bereichs stellen die Resultate mit unterschiedlichen Modellen für die Strukturfunktion des Photons dar.

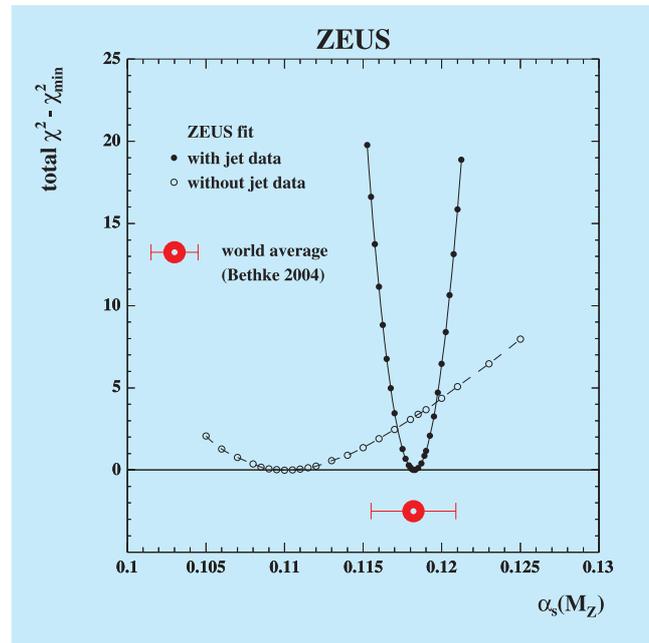


Abbildung 30: χ^2 -Profil als Funktion der starken Kopplungskonstanten α_s für den Fit mit und ohne Einbeziehung der Jet-Daten.

bevorzugten Wert von α_s anzeigt, und die Breite ein Maß für die experimentelle Unsicherheit ist. Man sieht, dass sich die Genauigkeit der α_s -Bestimmung durch die Einbeziehung der Jet-Daten entscheidend verbessert, darüber hinaus stimmt der resultierende Wert von $\alpha_s = 0.1183$ sehr gut mit dem Weltmittelwert überein.

Asymptotische Freiheit und Confinement

Ein herausragendes Charakteristikum der Quantenchromodynamik ist das Verhalten bei verschiedenen Skalen, das vom Confinement der Quarks bei kleinen Impulsüberträgen (und demnach großen Abständen) zur asymptotischen Freiheit bei hohen Impulsüberträgen (und kleinen Abständen) reicht. Für die Entdeckung dieses Prinzips erhielten Gross, Politzer und Wilczek im Jahre 2004 den Nobelpreis für Physik.

Für den experimentellen Nachweis des Skalenverlaufs der starken Kopplungskonstanten mussten in der Vergangenheit α_s -Messungen sehr unterschiedlicher Experimente kombiniert werden, was aufgrund

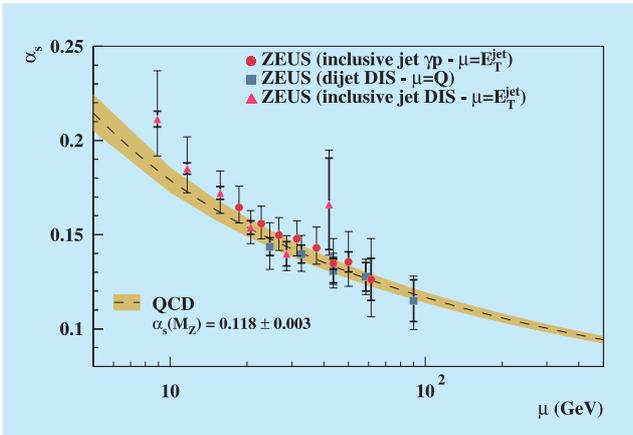


Abbildung 31: Q^2 -Abhängigkeit der starken Kopplungskonstanten, unter ausschließlicher Verwendung von ZEUS-Messungen bei HERA.

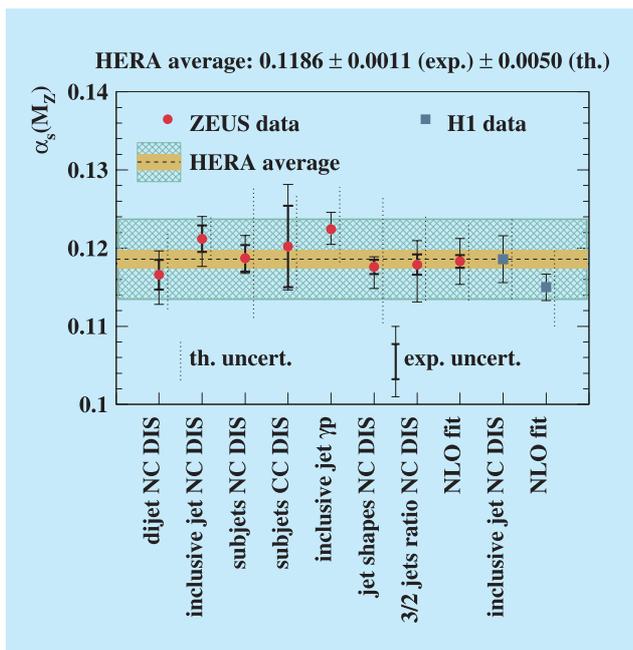


Abbildung 32: Übersicht von Messungen der starken Kopplungskonstanten aus Jets und QCD-Fits bei HERA.

der unterschiedlichen Systematik der Experimente mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Inzwischen ermöglicht jedoch die Vielfalt der Messmethoden bei HERA, den Verlauf der starken Kopplungskonstanten in einem einzigen Experiment zu bestimmen. Abbil-

dung 31 zeigt dies unter ausschließlicher Verwendung von Messungen der ZEUS-Kollaboration.

Die Resultate der bisherigen Abschnitte fügen sich nahtlos in eine umfassende Vermessung der starken Kopplungskonstanten ein. Eine Übersicht von α_s -Messungen bei HERA, bezogen auf die Skala der Z-Masse, ist in Abbildung 32 gezeigt. Die Konsistenz der Messungen aufgrund sehr verschiedener Methoden zeigt eindrucksvoll den Grad des erreichten theoretischen Verständnisses der Dynamik der starken Wechselwirkung, und die Ausgereiftheit der experimentellen Bestimmung.

Die Rolle der Diffraktion bei hohen Q^2

Zu den überraschenden Entdeckungen des bisherigen HERA-Programms gehört die signifikante Rolle diffraktiver Prozesse in der ep-Streuung. In einem substantiellen Teil der Wechselwirkungen wird das Proton offenbar nicht durch Herausschlagen eines seiner Partonen zerstört, sondern es bleibt intakt und nimmt lediglich durch Emission effektiv farbloser Austauschpartonen an der Wechselwirkung teil. Diese Prozesse erkennt man experimentell an der Menge deponierter Energie in unmittelbarer Nachbarschaft zum auslaufenden Protonenstrahl: während bei normalen tiefunelastischen Streueignissen hier die Fragmente des Protons viel Energie deponieren, zeichnen sich diffraktive Wechselwirkungen durch eine markante Leere in diesem Bereich aus, die man als Rapiditätslücke bezeichnet. Im Berichtszeitraum veröffentlichte ZEUS ein umfangreiches Papier, das die detaillierte Vermessung dieser Art von Wechselwirkung zusammenfasst.

Neben wesentlichen Aspekten für das Verständnis der starken Wechselwirkung kann Diffraktion aber auch ein idealer Mechanismus zur untergrundfreien Produktion schwerer Teilchen sein; beispielsweise hat man bei ZEUS hochreine Proben von Quarkonia wie Φ und J/Ψ studiert, in denen, bedingt durch die diffraktive Erzeugung, praktisch keine sekundären Reaktionsprodukte die Analyse stören. Für diese Art der Produktion interessiert man sich auch im Hinblick auf den am CERN in Genf im Bau befindlichen Large Hadron Collider

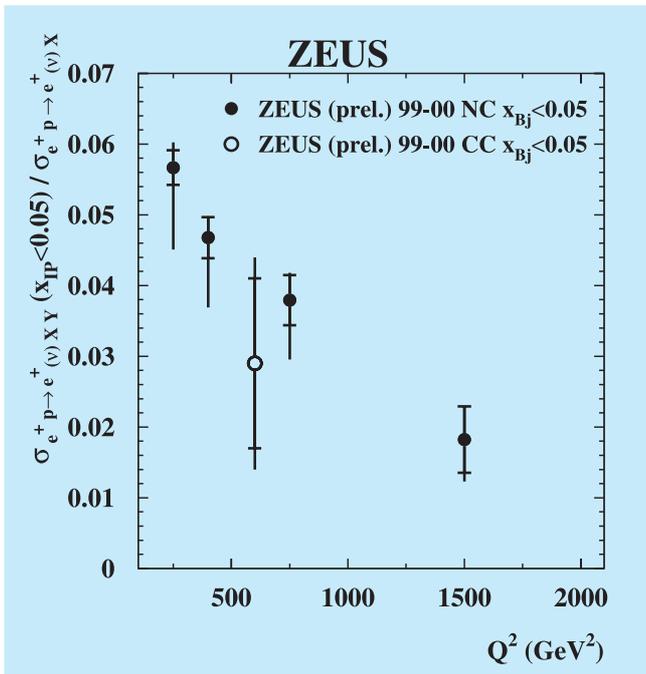


Abbildung 33: Relativer Beitrag von Ereignissen mit großer Rapiditätslücke zum inklusiven DIS-Wirkungsquerschnitt als Funktion von Q^2 , sowohl für den neutralen (gefüllte Kreise) als auch für den geladenen Strom (offener Kreis).

(LHC), denn in gewöhnlicher inklusiver Produktion müssen Signaturen z. B. des Higgs-Teilchens mit einer sehr großen Zahl von Reaktionsbeiprodukten konkurrieren. Diffraktive Endzustände dagegen könnten erheblich leichter zu analysieren sein, sofern sie bei diesen hohen Energien und Impulsüberträgen noch auftreten.

Es ist daher sehr wichtig zu untersuchen, ob es sich bei der Diffraktion möglicherweise um einen *Higher Twist*-Effekt handelt, der bei höheren Impulsüberträgen schnell ausstirbt. Bei ZEUS hat man in einer vorläufigen Studie den Anteil von Ereignissen mit diffraktiver Signatur in der tiefunelastischen Streuung mit geladenen und neutralen Strömen bei $Q^2 > 200 \text{ GeV}^2$ untersucht. Der resultierende Anteil diffraktiver Ereignisse am inklusiven DIS-Wirkungsquerschnitt (Abbildung 33) fällt zwar kontinuierlich mit wachsendem Q^2 , beträgt aber immer noch etwa 2% bei $Q^2 = 1500 \text{ GeV}^2$,

so dass diffraktive Signaturen auch bei hohen Impulsüberträgen immer noch mit hohen Raten erzeugt werden können und nicht „aussterben“. Darüber hinaus zeigt sich auch, dass die Wahrscheinlichkeit einer diffraktiven Anregung nicht davon abhängt, ob die Wechselwirkung durch einen geladenen oder neutralen Strom induziert wird.

Auf der Spur des Pentaquark-Rätsels

Die Bezeichnung Pentaquarks steht für hypothetische Hadronzustände die aus vier Quarks und einem Anti-quark gebildet werden. Eine Reihe von Experimenten, darunter auch ZEUS, hatten vor einiger Zeit Hinweise auf eine schmale Resonanz in der Region um 1530 MeV in den Zerfallskanälen nK^+ und pK_S^0 gefunden, die mit einem exotischen Pentaquark-Baryonzustand Θ^+ mit dem Quarkaufbau $uudd\bar{s}$ konsistent sein könnte. Eine umfassende endgültige Interpretation der vorliegenden Messungen steht jedoch noch aus.

Nach gängigen Modellvorstellungen ist das Θ^+ nur ein Zustand in einem Dekuplett von Pentaquarks mit Spin 1/2. Wenn diese Interpretation des Signals zuträfe, sollte man erwarten dass auch andere Mitglieder dieses Dekupletts nachgewiesen werden können. Insbesondere zwei Zustände doppelter Strangeness mit der Quarkstruktur $uuss\bar{d}$ und $ddss\bar{u}$, bezeichnet als $\Xi_{3/2}^+$ und $\Xi_{3/2}^-$ könnten vielversprechend sein, da das Experiment NA49 am CERN SPS vor gut einem Jahr von einem entsprechenden Signal bei einer Masse von 1862 MeV berichtet hat.

Das ZEUS-Experiment hat daher nach entsprechenden Signaturen in ep-Kollisionen gesucht. Diese exotischen Pentaquarks sollten im Zerfallskanal $\Xi^- \pi^\pm$ zu rekonstruieren sein, wobei Ξ^- ein seit langem bekanntes Baryon mit doppelter Strangeness ist, welches in $\Lambda \pi^-$ zerfällt. Wie in Abbildung 34 gezeigt, kann bei ZEUS ein sehr schmales und nahezu untergrundfreies Signal des Ξ^- -Baryons und seines Antiteilchens isoliert werden, hierbei wurde die Messung des spezifischen Energieverlusts zur Trennung von Pionen und Protonen ausgenutzt.

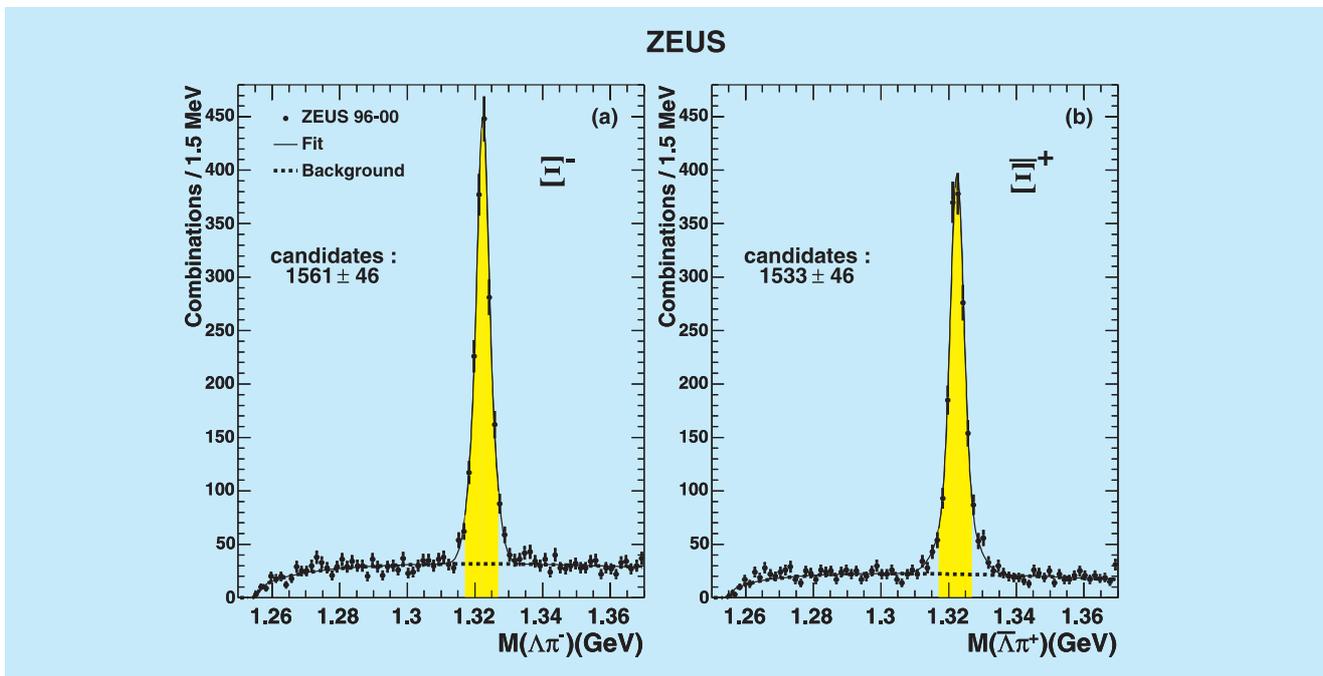


Abbildung 34: Rekonstruktion des Ξ^- und seines Antiteilchens in den $\Lambda\pi^-$ - und $\bar{\Lambda}\pi^+$ -Massenspektren.

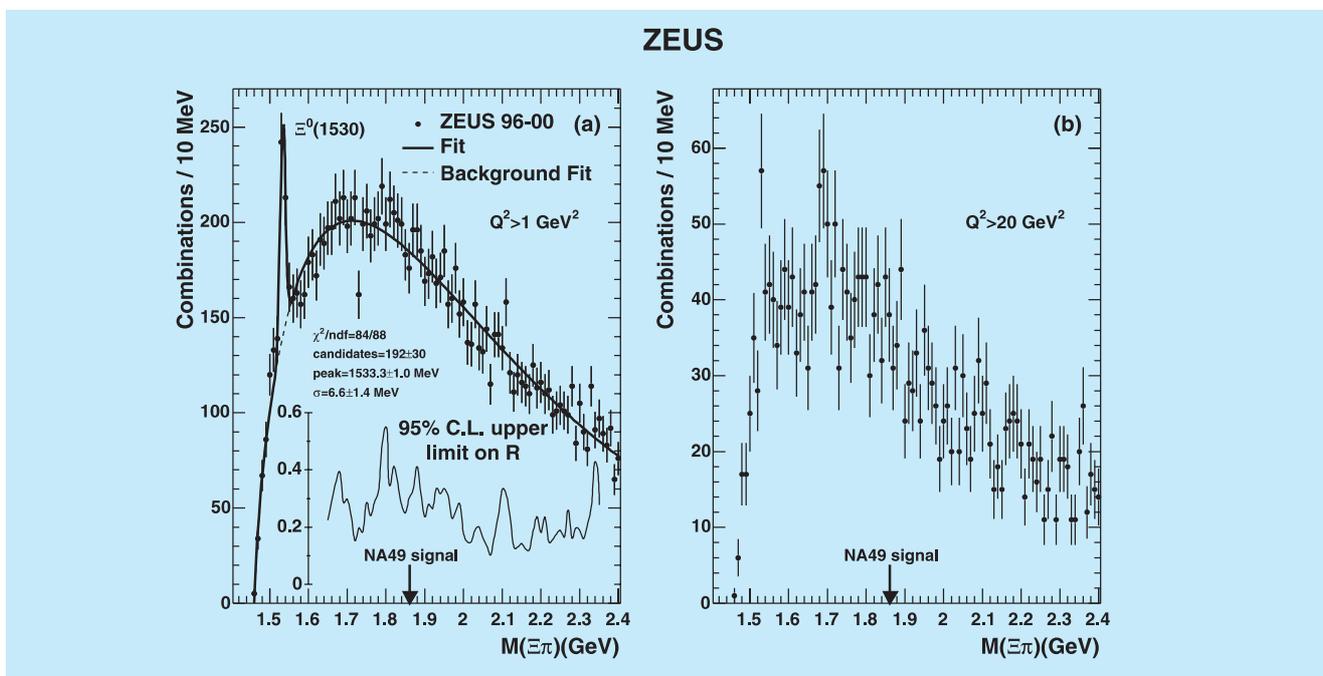


Abbildung 35: Spektren der invarianten Masse aller vier $\Xi^- \pi^\pm$ -Ladungskombinationen, links für $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$, rechts für $Q^2 > 20 \text{ GeV}^2$.

Kombiniert man diese Ξ -Kandidaten mit geladenen Pionen, so erhält man die in Abbildung 35 gezeigten Massenspektren. Man beobachtet einen scharfen Massenpeak oberhalb der Schwelle bei 1533 MeV, der mit der bekannten $\Xi^0(1530)$ Baryonresonanz identifiziert werden kann und das hohe Auflösungsvermögen des Experiments demonstriert. Die beobachtete Anzahl von $\Xi^0(1530)$ -Baryonen schließt auf eine vergleichbare Sensitivität der Experimente. Es ist jedoch kein Hinweis auf eine nicht identifizierte Resonanz zu finden, insbesondere gibt es in den ZEUS-Daten kein Signal im Massenbereich der NA49-Messung. Dies trifft auch für den Bereich höherer Q^2 zu, in dem bei ZEUS das Θ^+ Signal am stärksten ausgeprägt war. Im Bereich des NA49-Signals ergibt die ZEUS-Messung eine konservative Obergrenze von 29% relativ zur Produktionsrate des $\Xi^0(1530)$. Dies bedeutet allerdings keinen direkten Widerspruch zur NA49-Messung, da die Produktionsmechanismen in beiden Wechselwirkungstypen unterschiedlich sein können.

Für eine endgültige Klärung der Pentaquark-Frage wird daher die nächste Runde von Messungen abzuwarten sein. Bei ZEUS wird insbesondere die laufende

HERA II Datennahme die experimentelle Basis für Pentaquark-Studien erweitern.

Ausbildung

Entscheidende Beiträge sowohl zum Betrieb des Detektors wie zur Physikanalyse haben im Berichtsjahr 24 Diplomanden, 84 Doktoranden und 32 Nachwuchswissenschaftler (PostDocs) geleistet. Die DESY Gruppe des ZEUS Experiments hat dabei in enger Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg 11 Doktoranden betreut. Großen Zuspruch fand auch das Sommerstudenten-Programm des DESY, bei dem fortgeschrittene Studenten einige Wochen in den Forschungsgruppen mitarbeiten. Mit diesem Programm gelingt es häufig bei Studenten das Interesse an einer Diplom- oder Masterarbeit in der experimentellen Hochenergiephysik zu wecken. Auch Schüler arbeiten gelegentlich im Rahmen eines Praktikums für einige Zeit in der ZEUS-DESY Gruppe. Darüberhinaus kommt seit 10 Jahren regelmäßig ein Gymnasiallehrer, um für einige Zeit in den Sommerferien in der Gruppe mitzuarbeiten.