

Abbildung 24: Produktion von simulierten ZEUS Ereignissen auf dem GRID.

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, Panjab Univ. Chandigarh, 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, Univ. Malaya Kuala Lumpur, Chonnam Nat. Univ. Kwangju, Univ. Lodz, 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, York Univ. North York, Oxford Univ., Univ. und INFN Padova, Weizmann Inst. Rehovot, Univ. La Sapienza und INFN Roma, Polytech. Univ. Sagamihara, 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.

Sprecher: E. Gallo, INFN Firenze, Italien

Das Jahr 2006 begann für ZEUS und HERA mit einer Betriebsunterbrechung während der zum letzten Mal größere Umbauten und Verbesserungen an Detektor und Maschine vorgenommen wurden.

Daran anschließend wurde der sehr erfolgreiche Elektron-Proton Betrieb fortgesetzt. In dieser ersten Jahreshälfte wurden Daten mit einer integrierten Luminosität von 61 pb^{-1} aufgezeichnet. Damit stehen ZEUS nunmehr 215 pb^{-1} Elektron-Proton Daten zur Verfügung, das sind mehr als zehnmals so viele Daten wie bisher. Entsprechend dominierten die Arbeiten an diesen Daten die Analyse im Jahr 2006. Bei Positron-Proton Betrieb in der zweiten Jahreshälfte erreichte ZEUS eine sehr hohe Effizienz von 90%.

In den Analysen der Daten, welche im HERA II Run aufgezeichnet wurden, sind signifikante Entwicklungen und Schritte erreicht worden. Die gewonnenen Erkenntnisse und Entwicklungen sind nicht nur maßgeblich für das Fortschreiten der neuen Analysen, sondern tragen auch wesentlich zu Verbesserungen der laufenden Analysen der HERA I Daten bei.

Im Berichtszeitraum erfolgte die Publikation der ersten vollständig abgeschlossenen Analyse mit HERA II Daten.

ZEUS Betrieb

Bei der Betriebsunterbrechung zu Anfang des Jahres ging es vorrangig um die Reparatur des Straw-Tube-Trackers (STT) sowie um die Verbesserung der Kühlung von dessen Ausleseelektronik. Diese Arbeiten waren nötig, da es sich gezeigt hatte, dass bei längerem Betrieb des STT die unmittelbare Umgebung und damit insbesondere die zentrale Spurkammer und der supraleitende Solenoid durch die Abwärme gefährdet wurden. Diese Arbeiten konnten planmäßig ausgeführt und abgeschlossen werden, sodass der STT in der im Februar begonnen Datennahmeperiode ohne eine Beeinträchtigung anderer Teile des Detektors routinemäßig betrieben werden konnte. Darüber hinaus wurden große Teile des Hadron-Elektron Separators

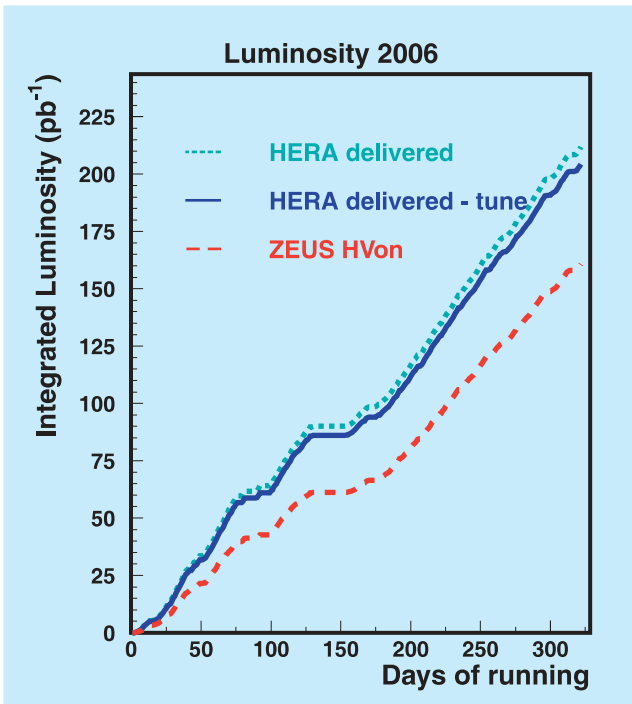


Abbildung 25: Die von HERA im Jahr 2006 für ZEUS gelieferte Luminosität.

(HES) im Vorwärtsteil des Uran-Kalorimeters repariert. Insbesondere mussten 5 sogenannte HES-Skis aus dem Uran-Kalorimeter gezogen, repariert und wieder installiert werden. Auch diese Arbeiten konnten im Zeitplan erledigt werden.

Zusätzlich wurden allgemeine vorsorgende Wartungsarbeiten durchgeführt, um zu erreichen, dass die folgende letzte Datennahmepériode von HERA mit höchster Effizienz durchgeführt werden kann. Beispielhaft dafür seien hier erwähnt:

- Verbesserung der Hochspannungsversorgung im Uran-Kalorimeter,
- Installation einer neuen Ausleseelektronik im RADMON System mit dem Ziel, den Schutz des Mikrovertexdetektors bei hoher Strahlenbelastung zu verbessern,
- Überprüfen und Beschaffen von Ersatzteilen für eine Vielzahl kritischer Komponenten.

Nach Abschluss dieser Arbeiten begann am 17. Februar der zweite Teil der Datennahme mit Elektronen, der bis zum 25. Juni andauerte. In diesem Zeitraum lieferte HERA 86 pb^{-1} von denen ZEUS 61 pb^{-1} aufzeichnen konnte. Daran anschließend wurde wieder auf Positron-Strahlbetrieb umgeschaltet und unter diesen Bedingungen ohne Unterbrechungen, sogar über den Jahreswechsel 2006/2007, Daten genommen. Die im gesamten Jahr 2006 gelieferte Datenmenge ist in Abbildung 25 dargestellt.

Simulation, Rekonstruktion und Analyse

Das wachsende Volumen der ZEUS Daten bedeuten für Simulation, Archivierung, Rekonstruktion und Analyse neue Herausforderungen. Konkret heisst das zum Beispiel, dass es zunehmend schwieriger wird, die nötige Rechenleistung an einem Ort zur Verfügung zu stellen. Bei ZEUS wurde daher frühzeitig damit begonnen, insbesondere die Simulation auf möglichst viele Rechner weltweit zu verteilen. Das von ZEUS entwickelte System, das diese Aufgaben realisiert, trägt den Namen *Funnel*. Funnel nahm gewissermassen die Ideen des *Computing Grid* vorweg, lange bevor es im Rahmen des LHC Computing realisiert wurde. Inzwischen stellt sich allerdings heraus, dass die für Funnel zugänglichen Rechner weniger werden, in dem Maße, in dem sich das LHC Computing GRID ausdehnt. Aus diesem Grund wurde Funnel technisch dem LHC Computing GRID angepasst, um auch auf längere Zeit Zugang zu ausreichenden Rechnerressourcen für ZEUS zu garantieren. Diese Aktivität stellte sich als ein durchschlagender Erfolg heraus. Durch diese Umstellung konnten die für ZEUS verfügbaren Simulationsressourcen nahezu verzehnfacht werden. Diese Entwicklung wird besonders durch Abbildung 24 verdeutlicht, die die Anzahl der simulierten Ereignisse als Funktion der Zeit zeigt. Der steile Anstieg nach August 2006 zeigt die Verbesserung durch die Umstellung des ZEUS Funnel Systems auf die Nutzung des GRID.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtszeitraum erwiesen sich die Daten des HERA I Runs als stetig sprudelnde Quelle für eine Fülle an neuen Ergebnissen. Dabei kamen vorwiegend erstmalige Analysen zu bislang unberührten Untersuchungsschwerpunkten zum Tragen. Neu entwickelte Analysetechniken ermöglichten dabei zum einen vorher nicht durchführbare Studien und zum anderen signifikante Verbesserungen von bereits früher publizierten Ergebnissen.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die gegenseitigen Wechselwirkungen von sub-atomaren Teilchen mit Hilfe von drei der vier bekannten Kräfte, der elektro-magnetischen, der schwachen (vereinheitlicht in der elektro-schwachen Kraft) und der starken Kraft. Zur Einbeziehung der vierten Kraft, der Gravitation, existieren verschiedene theoretische Modelle, die unterschiedliche Vorhersagen machen, welche erst mit höheren Energien, mit äußerst seltenen Prozessen oder der Beobachtung von exotischen Teilchen experimentell überprüft werden können. Doch auch Vorhersagen des gegenwärtigen Standardmodells mit seinen drei Kräften, sind Gegenstand von intensiven Studien mit experimentellen Messungen, denn auch nur kleinste Abweichungen können indirekt auf mögliche Erweiterungen zur vollständigen Theorie hindeuten. Außerdem gibt es im Rahmen des Standardmodells, das in seiner derzeitigen Form schon seit rund 25 Jahren die Basis der Teilchenphysik bildet, Eigenschaften der Wechselwirkungen und der Teilchen, die in ihrer Struktur aber nicht in ihrem Wert fest gelegt sind. Deshalb müssen verschiedene Parameter des Standardmodells und die Struktur von Teilchen durch präzise Messungen experimentell mit höchstmöglicher Genauigkeit bestimmt werden.

In diesem Zusammenhang tragen die veröffentlichten elf Publikationen des Berichtszeitraumes zu dem Verständnis in vier Bereichen bei:

- Messung von Parametern der elektro-schwachen Wechselwirkung (1),
- Messung der Struktur des Protons (2),

- Überprüfung von Vorhersagen der starken Wechselwirkung (7),
- Suche nach exotischen Teilchen in theoretischen Erweiterungen des Standardmodells (1).

Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Messung von Parametern der elektro-schwachen Wechselwirkung

In den Streueignissen bei HERA werden sogenannte Leptonen, Elektronen, bzw. deren Anti-Teilchen, Positronen, an Protonen gestreut. Strahlt in diesem $e^\pm p$ -Streuprozess das Lepton ein Photon oder, vermehrt bei höheren Impulsüberträgen Q^2 , ein Z-Boson, ab, welches dann mit einem Quark oder Gluon im Proton wechselwirkt, spricht man von einem neutralen Strom (*neutral current*, NC) Ereignis. Strahlt das Lepton ein geladenes W-Boson ab, so bezeichnet man dieses als Ereignis des geladenen Stromes (*charged current*, CC). In der Theorie der elektro-schwachen Wechselwirkung stellt die Spin-Struktur der Kopplungen der neutralen und der geladenen schwachen Strome eine grundlegende Eigenschaft dar. Nur links-händige Teilchen (Elektronen), bzw. rechts-händige Anti-Teilchen (Positronen) können an ein W-Boson koppeln. Dabei spricht man von Links-Händigkeit, wenn der Eigendrehimpuls (Spin) des Teilchens in Bewegungsrichtung zeigt, bzw. von Rechts-Händigkeit im umgekehrten Fall. Schon im letzten Jahresbericht wurden Messungen mit Ereignissen des geladenen Stroms beschrieben, die zeigen, dass diese Eigenschaft die Natur exakt widerspiegelt.

In der ersten Veröffentlichung, deren Analyse die neuen HERA II Daten zu Grunde liegen, wird eine weitere Eigenschaft der Spin-Struktur der schwachen Kopplung getestet. Die neuen HERA II Daten ermöglichen den Zugang zu den statistisch seltener auftretenden Streueignissen mit höheren Impulsüberträgen. Dabei erwartet man, dass die Stärke der Wechselwirkung von der Skala, dem negativen Quadrat des Vierer-Impulses, Q^2 , abhängt. Im Bereich von $Q^2 > 10^4 \text{ GeV}^2$ ist die schwache Wechselwirkung vergleichbar stark wie die

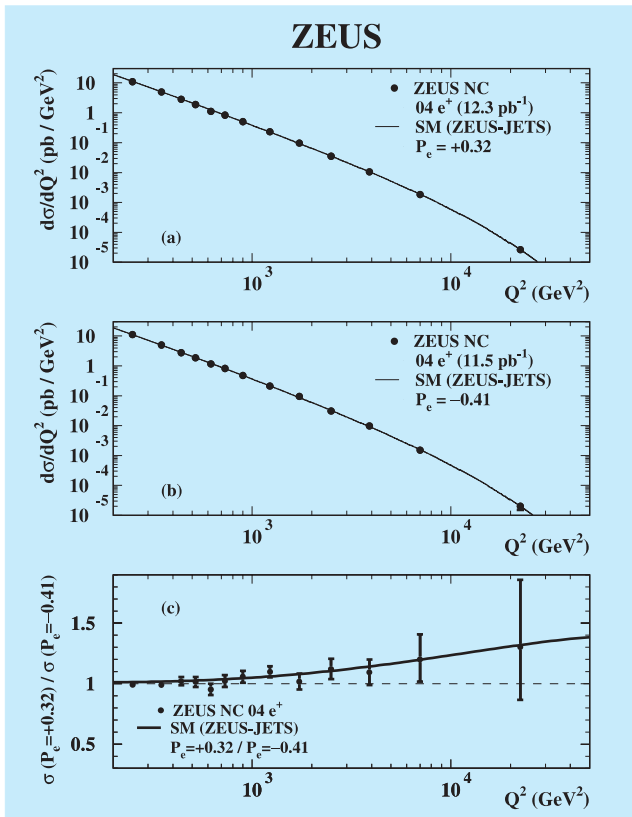


Abbildung 26: Wirkungsquerschnitt für Wechselwirkungen des neutralen Stroms in der tief-inelastischen e^+p -Streuung in Abhängigkeit vom mittleren Q^2 für zwei mittlere Werte des Polarisationsgrade der Positronen (Punkte), im Vergleich mit der Vorhersage der elektro-schwachen Theorie (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie markiert die Erwartung für das Verhältnis der Messungen bei den beiden verschiedenen Polarisationsgraden, wenn es keine Abhängigkeit von der Polarisation gäbe.

elektro-magnetische Wechselwirkung und dieser Messbereich eignet sich insbesondere, um die Vorhersagen der vereinheitlichten elektro-schwachen Theorie zu testen. Diese HERA Ergebnisse sind komplementär zu denen von LEP am CERN. Sie vermitteln einen Einblick in einen anderen kinematischen Bereich. Deshalb stellen diese neuen Messungen erstrangige und entscheidende Ergebnisse dar, die sehr schnell ihren Eingang in die Lehrbücher finden.

Bei hohen Werten von Q^2 sagt das Standardmodell voraus, dass im neutralen Strom vermehrt Z-Bosonen anstelle von Photonen ausgetauscht werden. Dabei hängt die Häufigkeit der Wechselwirkung auf andere Weise von der Polarisation der Leptonen ab. In den HERA II Daten ist genügend Statistik für verschiedene mittlere Polarisationsgrade vorhanden, so dass zwei verschiedene Datensätze mit unterschiedlicher Polarisation untersucht werden konnten. Abbildung 26 zeigt den Wirkungsquerschnitt als Funktion von Q^2 für die beiden analysierten Konfigurationen und vergleicht im untersten Bild ihr Verhältnis mit der Vorhersage des Standardmodells. Die Daten des neutralen Stroms befinden sich in exzellenter Übereinstimmung mit der Vorhersage. Ein wichtiger Bestandteil der Vorhersagen des Standardmodells ist hierbei die Struktur des Protons, für die eine früher veröffentlichte Messung des ZEUS-Experimentes verwendet wurde. Im nächsten Abschnitt werden zwei neue Messungen in diesem Bereich beschrieben.

Bestimmung der Strukturfunktion des Protons

Die Struktur des Protons kann aufgrund mathematischer Schwierigkeiten bislang nicht aus dem Standardmodell abgeleitet werden, sie geht aber als wichtiger Bestandteil in viele Vorhersagen ein. Eine der wichtigsten Motivationen für Streuexperimente mit dem HERA Speicherring, war und ist es immer noch, den Aufbau des Protons aus Partonen, den verschiedenen Arten von Quarks und den Binde-Teilchen den Gluonen, präzise zu vermessen. Generell wird die Struktur von Teilchen mit den sogenannten Parton-Dichten parameterisiert, welche die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der jeweiligen Partonen als Funktion ihres Impulsbruchteiles am Teilchenimpuls, x , und Q^2 in der Streuung angeben. Q^2 ist dabei in diesem Zusammenhang ein Maß für die Auflösung, mit der man, wie in einem Mikroskop die kleinsten Bestandteile im Proton auflösen kann. Je höher Q^2 , desto besser die Auflösung, aber auch desto seltener die Streuprozesse. Während mit den unschätzbaren Beiträgen von HERA im Bereich von kleinen x das Verständnis schon sehr weit fortgeschritten ist, gibt

es bei hohen Impulsbruchteilen, $x \rightarrow 1$, kaum Messungen weder von HERA noch von anderen Experimenten. Es ist eine Herausforderung einen solchen Zustand in dem ein einziges Parton praktisch den gesamten Impuls des Protons übernimmt, sowohl experimentell zu messen und als auch theoretisch zu berechnen.

Eine neue Analysetechnik macht nun eine Bestimmung möglich. Diese Analyse wird schematisch in Abbildung 27 verdeutlicht. Die Herausforderung besteht darin, die Ereignisse mit hohem Q^2 , das heisst mit einem hoch-energetischen Elektron bei großen Streuwinkeln, zu analysieren. Sie sind zwar leicht zu selektieren, jedoch kann die Kinematik des Streuprozesses nicht allein mit dem Elektron bestimmt werden. In diesem Bereich ist die Auflösung des Detektors nicht fein genug. Mit Hilfe des hadronischen Endzustandes, welcher in der Abbildung als Jet bezeichnet wird, und aus einem Bündel von Hadronen (Pionen, Kaonen, Protonen...) besteht, kann die Kinematik mit ausreichender Präzision bestimmt werden. Für Streuevents mit einem Impulsbruchteil x fast an dem Wert 1, liegt der hadronische Endzustand sehr nahe an der Strahlröhre, und geht teilweise, wie auch ein Anteil des Proton-Restes, in der Abbildung mit *proton remnant* bezeichnet, verloren. Deshalb wird für diese sehr hohen Werte von x das Ergebnis über einen größeren Bereich von x integriert angegeben und in der unteren Darstellung in Abbildung 27 mit einem Kreis anstelle eines Punktes angezeigt. Die Unsicherheiten in den derzeit verfügbaren Parameterisierungen sind groß, das heisst ihre Vorhersagen weichen recht stark voneinander ab. Die neuen Messungen werden helfen, die Parton-Dichten in diesem Bereich von x genauer zu parameterisieren und die erforderlichen theoretischen Berechnungen besser zu verstehen.

Auch in der nächsten Analyse werden Ereignisse mit einem oder mehreren produzierten Jets studiert. Ein Faktorisiertheorem der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, besagt, dass der Wirkungsquerschnitt in ein Produkt aus zwei Faktoren zerlegt werden kann. Dieses Produkt besteht aus einem Term, der den partonischen Streuquerschnitt beschreibt und einem zweiten Term der die Parton-Dichte-Funktion enthält. Wie vorher

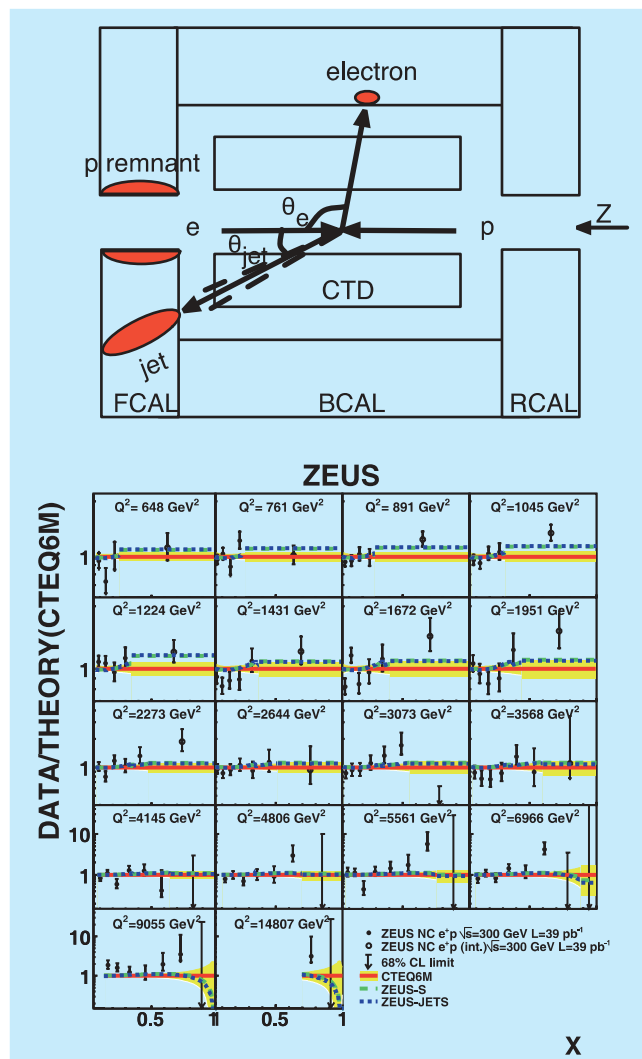


Abbildung 27: Oben: Schematische Darstellung des ZEUS Detektors mit eingezeichneter typischer Topologie der Ereignisse dieser Analyse. Die von links einlaufenden Elektronen werden unter einem großen Winkel gestreut. Unten: Verhältnis der gemessenen Daten zu den theoretischen Vorhersagen als Funktion von x für verschiedene Werte von Q^2 . Die Unsicherheiten in den theoretischen Vorhersagen, die verschiedene Parameterisierungen der Proton-Struktur verwenden, sind mit einem gelben Band gekennzeichnet. Sie sind im Bereich von x nahe 1 sehr groß.

erwähnt, lassen sich die Parton-Dichten im Standardmodell nicht berechnen, allerdings können sie, wenn eine Startverteilung gemessen wurde, mit verschied-

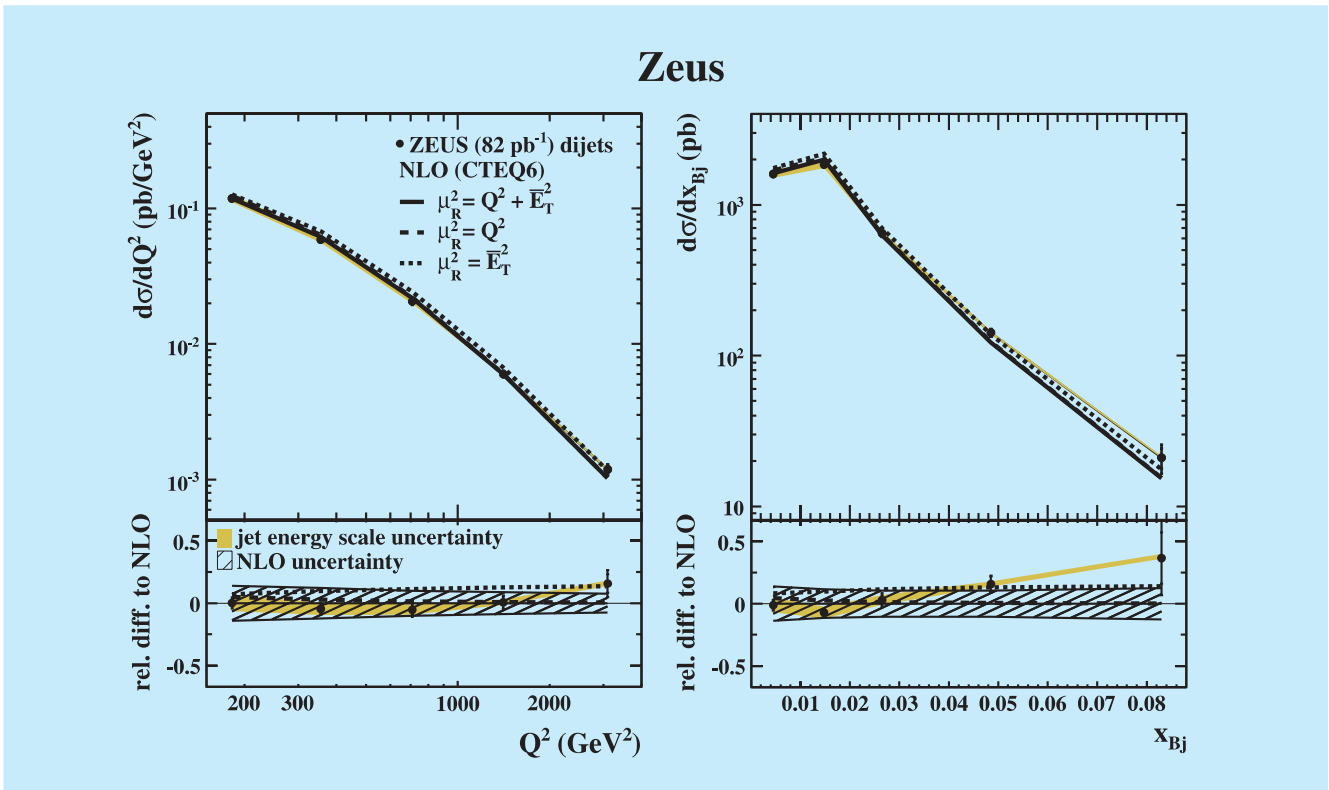


Abbildung 28: Wirkungsquerschnitte für die Produktion von zwei Jets als Funktion von Q^2 (links) und x (rechts). Die Daten (Punkte) werden mit theoretischen Vorhersagen (Linien) auf verschiedenen Skalen verglichen. Das Verhältnis von Daten zu Vorhersagen wird jeweils im unteren Abschnitt des Bildes dargestellt.

denen Ansätzen durch störungstheoretische QCD Berechnungen in andere kinematische Bereiche entwickelt werden. Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Messmethode gibt direkte Auskunft über die Quark-Dichten. Die Gluonen-Dichte dagegen ist nur indirekt über diese Entwicklungsberechnungen zugänglich. Die Produktion von Jets helfen daher, die Gluonen-Dichte im Proton mit höherer Genauigkeit zu bestimmen und die Gültigkeit der Berechnungen zu überprüfen.

Die Abbildung 28 zeigt den gemessenen Wirkungsquerschnitt für Zwei-Jet Erzeugung als Funktion von Q^2 und x . Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse einer theoretischen Berechnung eingetragen, die eine von mehreren möglichen Parameterisierungen der Proton-Struktur verwendet. Die Daten und die Be-

rechnungen sind miteinander in guter Übereinstimmung. Bei dem Vergleich zeigt sich deutlich, dass für die Daten eine exzellente Präzision erreicht wurde, die durch das gelbe Band gekennzeichnet ist. Im Gegensatz dazu bestehen in der Theorie große Unsicherheiten (schwarz-schraffiertes Band). Die Unsicherheit wird von der anzuwendenden Skala dominiert. In den Berechnungen ist es möglich, die Skala, auf der die Parton-Dichten in den relevanten kinematischen Bereich der Messung entwickelt werden, in drei verschiedenen Ansätzen zu wählen. Für die Jet-Produktion kann die Skala durch Q^2 gegeben sein, durch die transversale Energie der erzeugten Jets (E_T) oder durch eine Kombination der beiden. Um solche Unsicherheiten in den theoretischen Modellberechnungen zu verkleinern, werden große Anstrengungen, nicht nur in der Theorie, sondern auch experimentell

durch spezielle Messungen, unternommen. Beispiele solcher Messungen werden im Folgenden näher beschrieben.

Messungen für die Quantenchromodynamik

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, spielt die anzuwendende Skala in der Quantenchromodynamik eine bestimmende Rolle, denn von ihrer Größe wird das Verhalten der starken Kraft bestimmt. Die Abhängigkeit der starken Kopplung α_s von der Skala führt bei größeren Impulsüberträgen Q^2 , gleich bedeutend mit kleinen Abständen, zur asymptotischen Freiheit der stark wechselwirkenden Partonen. Jedoch bei kleinen Impulsüberträgen, großen Abständen entsprechend, führt sie zum sogenannten *Confinement* der Quarks und Gluonen. Aufgrund der extremen Stärke der Kopplung bei großen Abständen können die in der Streuung erzeugten Quarks und Gluonen nicht frei existieren, sondern binden sich zu Hadronen zusammen. Dieser Prozess wird auch Hadronisierung genannt. In den Messungen werden anschließend nah beieinanderliegende Hadronen zu Jets zusammengefasst. Abbildung 29 verdeutlicht mit welcher hoher Genauigkeit die starke Kopplung in Abhängigkeit von der Skala, hier des Transversal-Impulses der Jets (E_T), mit den Jet-Daten bei HERA bestimmt werden kann. Weitere verschiedene Methoden stehen zur Verfügung, so dass letztendlich die HERA Daten zur präzisesten experimentellen Bestimmung dieser fundamentalen Größe führen.

Die Reduzierung der Unsicherheit in der Bestimmung der starken Kopplung ist extrem wichtig für die Teilchenphysik, sowohl im übergreifenden Bild der Kräfte als auch im Rahmen der QCD. Der Verlauf ihrer Stärke hat direkten Einfluss auf die Extrapolation der drei Kräfte im Standardmodell bis hin zur Planck-Skala zur Vereinheitlichung aller vier Kräfte. Innerhalb der QCD spielt die fundamentale starke Kopplung α_s eine zentrale Rolle, denn die Wirkungsquerschnitte für starke Wechselwirkungen werden zur Vereinfachung der hoch-komplexen Ausdrücke in Potenzreihen von α_s

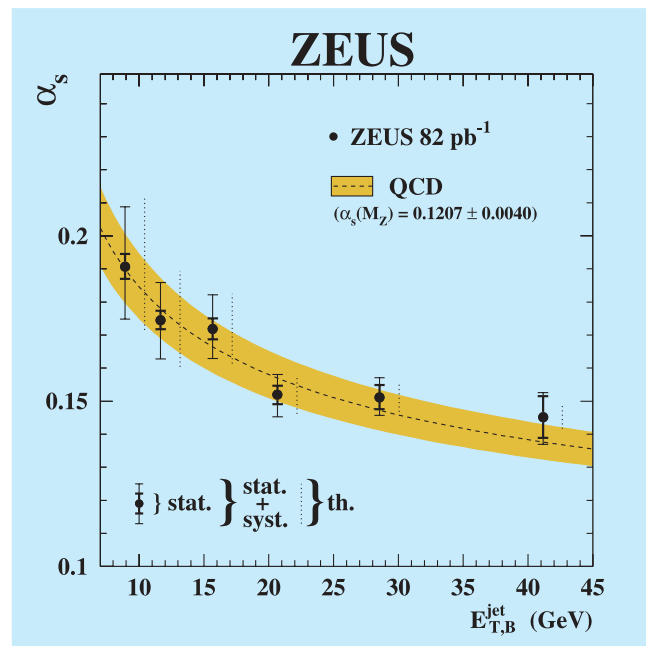


Abbildung 29: Werte für α_s als Funktion der transversalen Energie der Jets E_T^{jet} . Die Messungen (Punkte) werden mit einer QCD-Vorhersage (Kurve) verglichen. Die Unsicherheit in der theoretischen Vorhersage wird mit einem gelben Band verdeutlicht.

entwickelt. Für die Jet-Erzeugung bei HERA sind die störungstheoretischen Berechnungen in der führenden Ordnung (LO, *leading order*) und in der nächstführenden Ordnung (NLO, *next-to-leading order*) bekannt. Nur für sehr wenige Prozesse stehen auch schon die Berechnungen einer weiteren Ordnung (NNLO) zur Verfügung. Die Messungen, speziell bei HERA, ermöglichen einzigartige Einblicke in die QCD und führen direkt zu Weiterentwicklungen ihres theoretischen Verständnisses. Der HERA Speicherring wird deshalb auch gern als QCD-Maschine bezeichnet.

Die für die QCD relevanten Veröffentlichungen des letzten Jahres lassen sich in zwei Kategorien einordnen:

- Produktion von Teilchen, wie prompte Photonen, Teilchen mit Strange-Quarks und Teilchen mit Beauty-Quarks,
- Studien zur Ereignistopologie, wie der Ereignisform mit unterschiedlichen Messgrößen, von

möglichen azimuthalen Asymmetrien oder der Trennung von zwei produzierten Jets durch einen Bereich ohne Teilchenproduktion.

Die Ereignisse mit einem isolierten Photon, den sogenannten prompten Photonen, bieten ein exzellentes Werkzeug, um harte Streuprozesse bei HERA zu studieren. Vier Beispiele zur Erzeugung dieser prompten Photonen sind in Abbildung 30 dargestellt. Weil isolierte Photonen nach der Streuung keine Hadronisierung durchlaufen, kann man mit diesen Ereignissen die zugrundeliegenden Prozesse auf der Parton-Ebene studieren. Die Erzeugung prompter Photonen zusammen mit einem Jet, ist direkt abhängig von den Quark-Dichten im Proton (Abbildung 30 a) und b)). In der Wechselwirkung dieser beiden Darstellungen reagiert das Photon punktförmig. In den beiden Abbildung 30 c) und d) reagiert das Photon wie ein Hadron. Für diesen Fall können für das Photon, ebenso wie für das Proton, Parton-Dichten definiert und über diese Reaktionen gemessen werden. Durch Vergleiche mit theoretischen

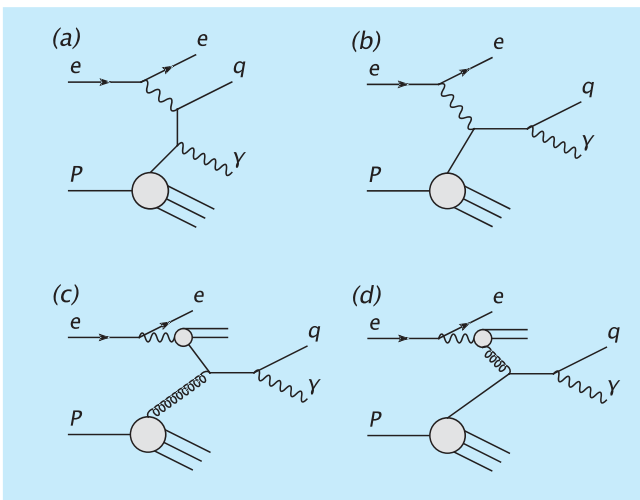


Abbildung 30: Feynman-Diagramme von vier Prozessen in $e p$ Streuungen, die zur Produktion eines prompten Photons und eines Jets führen. Das Elektron und das Proton laufen von links ein. Das Elektron strahlt ein Photon ab, das mit dem Proton entweder punktförmig in (a) und (b) oder hadronisch in (c) und (d) wechselwirkt. Das erzeugte prompte Photon (γ) und der Jet aus dem hadronisierten Quark (q) verlassen nach rechts die Wechselwirkungszone.

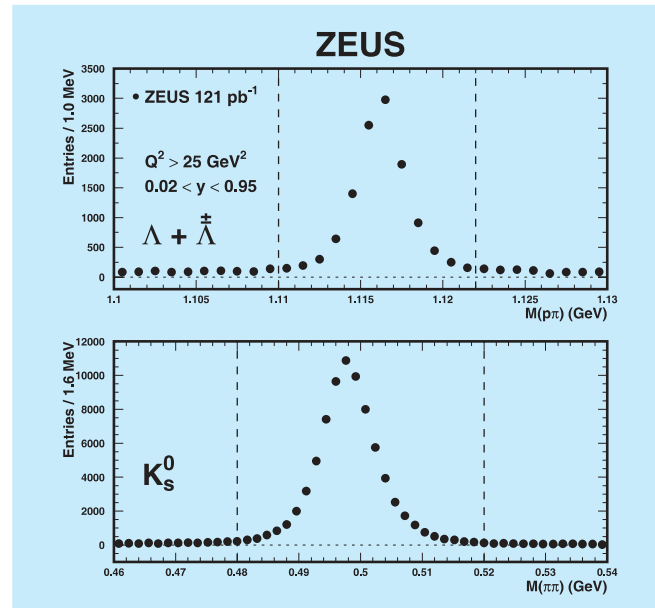


Abbildung 31: Verteilungen der Masse von rekonstruierten Teilchenkandidaten im Datensatz für $\Lambda + \bar{\Lambda}$ und K_s^0 Erzeugung. Insgesamt befinden sich nach der Subtraktion des Untergrundes rund 10730, bzw. 73140, Teilchenkandidaten im Bereich zwischen den beiden Markierungslinien.

Berechnungen werden auch diese Parton-Dichten im Photon überprüfbar. In der Analyse zeigte sich, dass Simulationen in führender Ordnung die gemessenen Wirkungsquerschnitte unterschätzen. Mit der nächsten Ordnung in den Berechnungen werden diese Diskrepanzen reduziert, es bleibt allerdings bei einer Unterschätzung der Vorhersagen im Bereich von kleinen transversalen Energien für das Photon und den Jet. Hier sind die Berechnungen sehr abhängig von der Einbeziehung noch höherer Ordnungen und der Behandlung der Hadronisierungseffekte für den Jet. Eine bessere Beschreibung der Daten konnte durch Berechnungen erzielt werden, in denen eine QCD Faktorisierung relativ zum intrinsischen transversalen Impuls der Partonen (k_t) realisiert wurde und nicht wie sonst üblich zum longitudinalen Impulsbruchteil x . Geht man in den Bereich von höheren transversalen Impulsen des Photons, stimmen alle Berechnungen gut mit den Daten überein.

Die Produktion von neutralen Hadronen, die eine spezielle Art von Quarks, die Strange-Quarks enthalten,

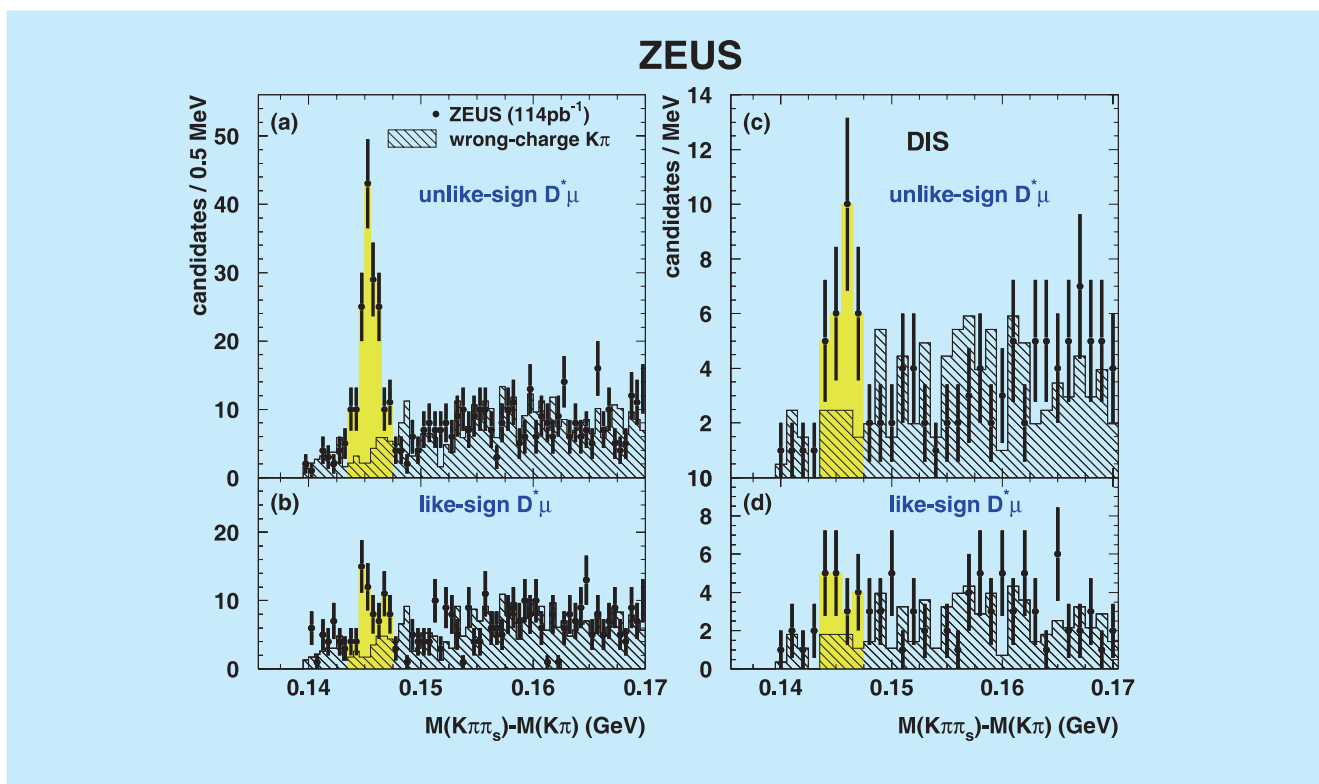


Abbildung 32: Verteilung der Massendifferenzen für $D^*\mu$ Kandidaten. In den Daten (Punkte) erhebt sich klar das Signal (gelb markiert) über den kombinatorischen Untergrund (gestricheltes Histogramm).

gehört zum Messprogramm an allen Teilchenbeschleunigern, wie beispielsweise e^+e^- bei LEP, $\bar{p}p$ am Tevatron, pp bei RHIC, und wurde auch in ep bei HERA schon intensiv studiert. Die Daten wurden zu Tests der QCD Vorhersagen herangezogen und für Weiterentwicklungen von phänomenologischen Modellen verwendet. Letztere ermöglichen QCD Vorhersagen, die sich nicht nur aus den grundlegenden Prinzipien ableiten lassen. Die Ergebnisse gehen direkt in die Modelle ein, mit denen die Produktion von Hadronen bei hohen Energien beschrieben wird. Abbildung 31 zeigt das Signal für die untersuchten Hadronen, Λ und $\bar{\Lambda}$, sowie K_s^0 . Im Allgemeinen sieht man eine gute Übereinstimmung der Modelle mit den Daten. Die Messungen bei HERA decken sich mit den Ergebnissen aus e^+e^- Kollisionen bei LEP.

Die Erzeugung von sogenannten Beauty-Quarks erlaubt stringente Tests für störungstheoretische QCD-Berechnungen.

Weil die Masse der Beauty-Quarks in etwa $5 \text{ GeV}/c^2$ beträgt und der Prozess somit intrinsisch über eine Skala verfügt, die hoch genug ist, geht man davon aus, dass die Vorhersagen schon in der nächst führenden Ordnung verlässlich sind. In der publizierten Analyse wurde konkret die Reaktion

$$ep \rightarrow e\bar{b}X \rightarrow eD^*\mu X'$$

studiert. Diese Reaktion liefert einen mit Beauty-Quarks angereicherten Datensatz, für den gleichzeitig der Untergrund anderer Prozesse stark unterdrückt ist. Damit ist es möglich, sehr niedrige Transversal-Impulse p_T zu selektieren und so nah wie nie zuvor an die Produktionsschwelle heranzureichen. Abbildung 32 zeigt, wie das Signal für das durch die Reaktion produzierte $D^*\mu$ in der Massenverteilung aller Ereigniskandidaten heraustritt, wenn die richtigen Ladungskombinationen gebildet werden. In der Abbildung sind die Datensätze

für sehr kleine Werte von Q^2 nahe Null und für höhere Werte getrennt dargestellt. Die gemessenen Wirkungsquerschnitte sind größer als die Berechnungen in nächst-höherer Ordnung vorhersagen. Allerdings liegen die Abweichungen innerhalb der Unsicherheiten der Messung und der Berechnungen.

In der zweiten Kategorie der QCD Studien wird die generelle Form der Ereignisse, die Verteilung der produzierten Teilchen, analysiert. In der als nächstes beschriebenen Publikation werden sechs verschiedene Messgrößen für die Ereignistopologie untersucht. Sie sind innerhalb der QCD berechenbar, teilweise sind die Vorhersagen in der nächst-höheren Ordnung schon bekannt. Diese Präzisionstests für die QCD Vorhersagen erfordern ein gutes Verständnis aller Effekte, auch derjenigen, die nicht störungstheoretisch berechenbar sind, wie beispielsweise der Prozess der Hadronisierung. Der Einfluss dieser nicht-störungstheoretischen Korrekturen ist umgekehrt proportional zu einer Potenz von Q^2 . Dabei wird zusätzlich zur starken Kopplung α_s eine effektive Kopplung α_0 für niedrige Energien definiert, die für alle Ereignisformen universal ist. Dieser Ansatz erlaubt es, sowohl α_s als auch α_0 durch Anpassungen der Modell-Abhängigkeiten an die Daten zu bestimmen. Die neue Veröffentlichung verbessert eine ähnliche, früher veröffentlichte Publikation mit weitaus höherer Statistik und durch die Hinzunahme von zwei weiteren Messgrößen. Mit der höheren Statistik ist es möglich, den Datensatz in verschiedene Untergruppen zu teilen, hierdurch werden die Tests zur Gültigkeit der angewandten Modellannahmen immer exakter.

Abbildung 33 stellt die sechs Messgrößen für zwei verschiedene Bereiche in Q^2 in Abhängigkeit von α_s und α_0 dar. Unter den sechs Messgrößen befindet sich beispielsweise der *Thrust* (T), der angibt wie stark das erzeugte hadronische System longitudinal ausgerichtet ist, während B, das *jet broadening* die Ausbreitung in transversaler Richtung beschreibt. Auch die invariante Jet Masse, M^2 , wird ausgewertet. In den beiden Darstellungen ist sichtbar, dass nicht alle Messgrößen die gleichen Werte für α_s und α_0 bevorzugen, auch nicht innerhalb der Unsicherheiten der einzelnen Messungen. Dies deutet auf Probleme in der theoretischen Beschreibung hin. Obwohl die angewandten nicht-störungstheo-

retischen Korrekturen die anderen studierten Abhängigkeiten generell gut beschreiben, wird hier klar, dass die Prozesse, die in den höheren Ordnungen berechnet werden müssen und die in diesen Berechnungen noch nicht eingeschlossen sind, einen großen Einfluss haben.

Eine ähnliche Schlussfolgerung lässt sich aus einer weiteren Studie der Ereignisform ableiten. In ihr wurde der Energie-Fluss in den erzeugten hadronischen Endzuständen gemessen, um Rückschlüsse auf etwaige azimuthale Asymmetrien zu ziehen. Es zeigte sich, dass die Berechnungen in der nächst-höheren Ordnung die gemessenen Momente der azimuthalen Asymmetrie besser beschreiben als die etwas niedrigere Ordnung. Aber auch hier sind Defizite sichtbar, die darauf hinweisen, dass Berechnungen in der noch höheren Ordnung erforderlich sind, um eine zufriedenstellende Beschreibung der Daten zu ermöglichen.

Eine ganz besondere Ereignistopologie wurde in den Datensätzen mit zwei Jets untersucht. In diesen Datensätzen tauchen Ereignisse auf, in denen die Jets durch eine Rapiditätslücke, einem Bereich ohne Teilchen-Aktivität, getrennt sind. In den gewöhnlichen Wechselwirkungen der starken Kraft ist dies nur durch äußerst seltene statistische Fluktuationen möglich, die exponentiell mit wachsendem Abstand der Jets unterdrückt sind. Erklärungsansätze gehen unter anderem von einem gleichzeitigen Austausch zweier Gluonen aus. Dieser Zustand hat dann die Quantenzahlen des Vakuums, kann aber trotzdem stark wechselwirken. Nur Simulationen, die zusätzlich zu den üblichen Wechselwirkungen auch ein Modell eines solchen Zustandes enthalten, können die Daten beschreiben. Diese Art von Wechselwirkungen mit einem Zustand mit Vakuum-Quantenzahlen erscheint auch in anderen Streuprozessen, beispielsweise mit einer Rapiditätslücke in der Proton-Richtung. Wie bei der Messung der Struktur des Protons kann man auch in diesen speziellen, nach einem Analogon in der Optik auch diffraktiv genannten, Ereignissen versuchen, die diffraktive Struktur des Protons zu messen. In diesen Analysen gab es im vergangenen Jahr große Fortschritte, beispielsweise konnten erstmalig innerhalb eines Experimentes die drei möglichen Selektionsmethoden für diese speziellen Ereignisse gleichzeitig angewandt werden. Dadurch war es

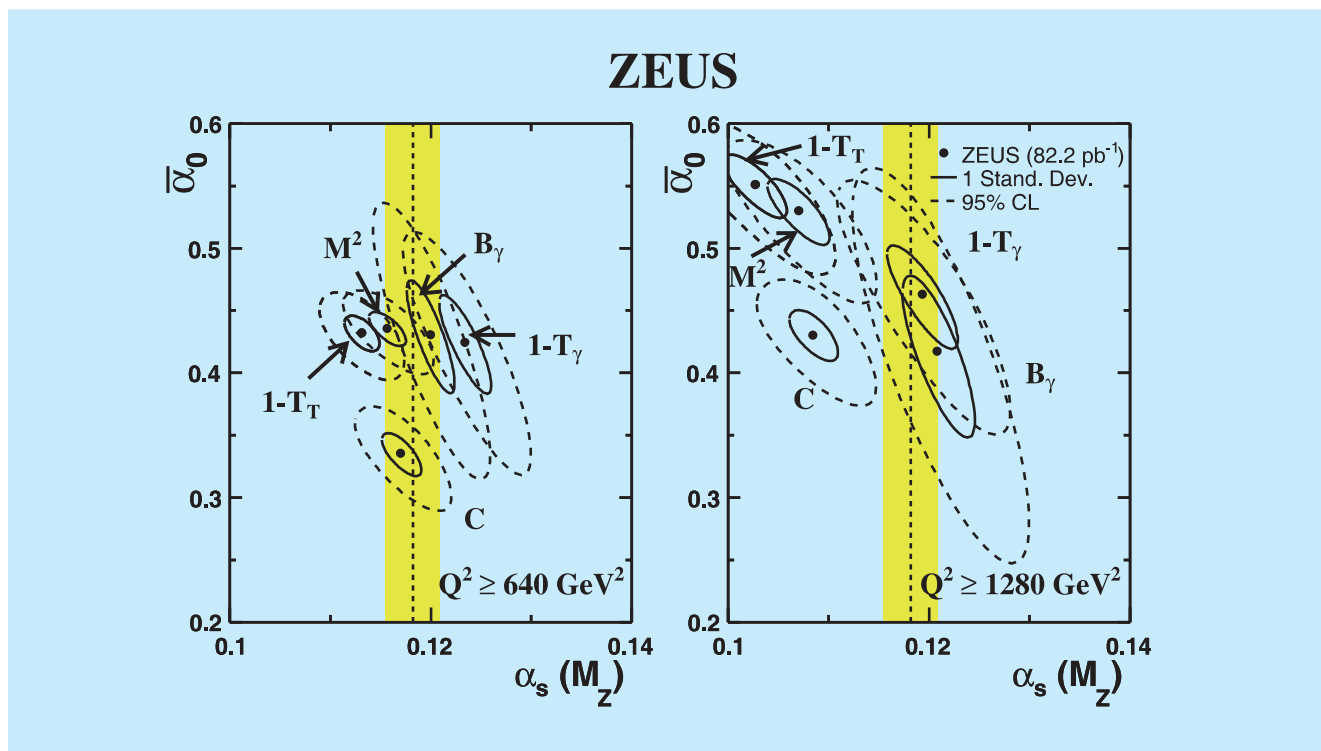


Abbildung 33: Werte für α_s und α_0 , extrahiert aus Anpassungen an die Verteilungen der verschiedenen Messgrößen zur Form der selektierten Ereignisse.

möglich, Diskrepanzen, die in den vergangenen Jahren immer wieder auftraten, zu verstehen und aufzulösen. Die Ergebnisse mit den einzelnen Selektionsmethoden stimmen im Allgemeinen gut überein und das Verständnis von noch vorhandenen, kleineren Abweichungen schreitet zügig voran.

Suche nach exotischen Teilchen

Das Standardmodell beinhaltet in seiner derzeitigen Form drei der vier bekannten Kräfte. Zur Vereinheitlichung aller vier Kräfte gibt es verschiedene theoretische Ansätze. Viele von ihnen erfordern eine neue fundamentale Symmetrie (Super-Symmetrie, SUSY) zwischen den Fermionen (Teilchen mit halbzahligen Spin, z.B. Elektronen) und den Bosonen (Teilchen mit ganzzahligen Spin, z.B. Photon, Gluon). Zur Erfüllung dieser neuen Symmetrie müssen neue Teilchen existieren, welche die SUSY-Partner der Teilchen

im Standardmodell darstellen. Bei ihnen ist dann der Spin um jeweils $1/2$ geändert. Die Suche nach diesen super-symmetrischen Teilchen stellt einen weiteren sehr intensiv verfolgten Analysebereich an allen Beschleunigern der Welt dar. Bisher wurden allerdings noch keine Anzeichen für diese exotischen Teilchen gefunden.

Eine Veröffentlichung im Berichtszeitraum befasste sich mit der Suche nach einem dieser exotischen Teilchen, dem Top-Squark. Dieses Teilchen ist der super-symmetrische Partner zum Top-Quark im Standardmodell und ist der leichteste Zustand für Quarks in SUSY. Bei HERA kann das Top-Squark durch ein Positron und ein Down-Quark erzeugt werden und sein Zerfall kann in einem hoch-energetischen Positron oder Neutrino und hadronischen Jets enden. Dies ist eine sehr klare Signatur, nach der im gesamten zur Verfügung stehenden Datensatz gesucht werden kann. Diese deutliche Signatur hilft auch den Untergrund effizient zu separieren.

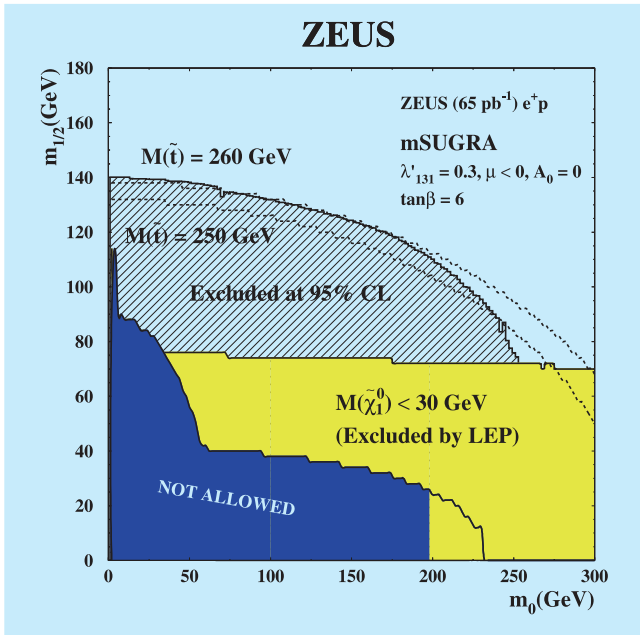


Abbildung 34: Darstellung des für Top-Squark-Produktion zugänglichen Bereiches in m_0 und $m_{1/2}$. Mit dem schraffierten Bereich wird die Existenz von Top-Squarks mit Massen bis zu $260 \text{ GeV}/c^2$ (obere gestrichelte Linie) ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Analyse können im Rahmen des minimalen Super-Gravitationsmodells (mSUGRA) interpretiert werden. Im mSUGRA Modell wird angenommen, dass zwei der freien Parameter festgelegt werden können und zwar die Massenskalen, m_0 und $m_{1/2}$, die universell für alle s-Fermionen und Gauginos gelten sollen.

Abbildung 34 zeigt das Ergebnis der Analyse als Korrelation zwischen diesen beiden Massenskalen. Die Tatsache, dass kein Ereignis gefunden wurde, das mit einer Top-Squark-Produktion kompatibel ist, bedeutet, dass die Existenz von Top-Squarks bis nahezu einer Masse von $260 \text{ GeV}/c^2$ ausgeschlossen werden kann.

Ausblick

In der ersten beschriebenen ZEUS-Analyse in diesem Bericht wurde gezeigt, wie neue Analysetechniken zum weiteren Verständnis beitragen und weitere vorher nicht

durchführbare Analysen erlauben. In den meisten bisher gezeigten Analysen sind die Möglichkeiten der neu eingebauten Detektorkomponenten noch nicht voll ausgeschöpft und in diesem Ausblick wird demonstriert, welches Potenzial sich noch durch die neuen Detektorkomponenten, den Mikrovertex Detektor (MVD) und den Strawtube Tracker (STT), bieten.

Abbildung 35 zeigt in der linken Darstellung das Signal für D^\pm Teilchen, so wie sie in den HERAI Daten mit den Spurdetektoren dieser Datennahmezeit selektiert werden konnten. Die obere Darstellung vermittelt einen Eindruck, wie das Signal in den HERA II Daten aussähe, wenn ähnliche Selektionskriterien angewandt würden. Es entspricht in etwa dem Signal aus den HERA I Daten, allerdings kann man aufgrund der besseren Statistik in den HERA II Daten schon eine Verbesserung in den statistischen Unsicherheiten erreichen. Dies wird durch die Zahlen in Tabelle 3 verdeutlicht.

Die absolute Anzahl der Ereignisse ist nicht in allen Fällen gleich, weil unterschiedliche Schnitte zur Selektion angewendet wurden und die Datensätze unterschiedlich groß sind. Bei der Ausnutzung der Möglichkeiten mit dem MVD, mit dem die Spuren der erzeugten Teilchen ganz nah am Erzeugungspunkt präzise vermessen werden können, verbessert sich die Nachweisgenauigkeit signifikant. In Tabelle 3 sieht man in dem Übergang von HERA I zu HERA II alt und neu eine Verbesserung in der relativen Genauigkeit der Ereignisanzahl von 10% auf 8% und durch die Analyse des MVD's auf 4%. Auch in der Genauigkeit der Breite des Signals werden große Fortschritte erreicht: sie wird von 1.3 MeV über 0.8 MeV auf 0.5 MeV um fast einen Faktor drei verbessert.

	HERA I	HERA II alt	HERA II neu
Luminosität	80 pb ⁻¹	135 pb ⁻¹	135 pb ⁻¹
Q ²	> 2	> 5	> 5
Ereignisse	4790 ± 10%	4419 ± 8%	2181 ± 4%
Breite [MeV]	11.5 ± 1.3	10 ± 0.8	11 ± 0.5
Masse [MeV]	1866 ± 1	1864 ± 2	1865 ± 1

Tabelle 3: Verfügbare Statistik und Ergebnisse zum Nachweis von D^\pm Teilchen.

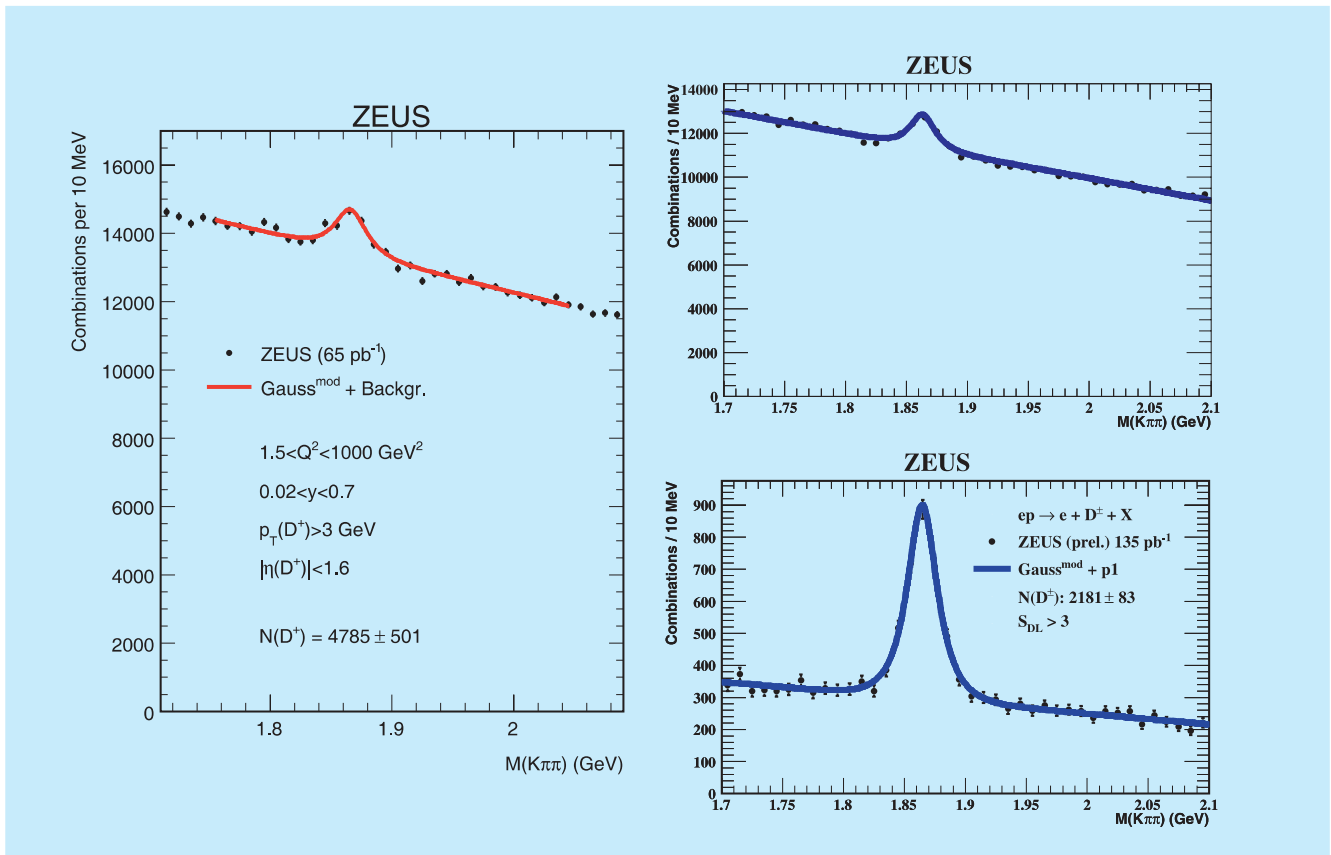


Abbildung 35: Verteilung der Massen für D^\pm Kandidaten in den HERA I Daten (links) und in den HERA II Daten (rechts). In den HERA II Daten ist einmal eine Selektion ähnlich wie in den HERA I Daten angewandt worden (oben) und einmal die Selektion unter Einsatz des MVDs verbessert worden (unten).

Dieses ausgewählte Beispiel vermittelt einen Eindruck von den Verbesserungen und den neuen Möglichkeiten, die sich mit der hohen Statistik der HERA II Daten und den neuen Detektorkomponenten ergeben. Viele

neue Analysen sind schon im Endspurt zur Veröffentlichung und die neuen Daten mit verminderter Protonen-Energie stellen viele weitere höchst interessante und bedeutende Ergebnisse in Aussicht.