



Abbildung 36: Der Vorwärtsbereich des ZEUS Detektors während des Ausbaus einer der großen inneren Myonkammern. Links im Bild orange erkennt man das Eisenjoch und im rechten Teil die Rückseite des Vorwärtskalorimeters, aus dem bereits die Photoröhren entfernt wurden.

# 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.

**Specher:** E. Gallo, INFN Firenze, Italien

**Das Jahr 2007 markiert einen wichtigen Einschnitt in der Teilchenphysik: Der weltweit einzige Elektron-Proton Collider HERA wurde nach 15 Jahren erfolgreicher Betriebszeit und mehr als  $500 \text{ pb}^{-1}$  integrierter Luminosität am 30. Juni abgeschaltet. Damit ging auch die Datennahme des ZEUS Experimentes zu Ende über dessen Arbeit und Ergebnisse in 2007 hier berichtet werden soll.**

## HERA Betrieb und ZEUS Datennahme

Über die HERA Gesamtlaufzeit von 15 Jahren konnte das ZEUS Experiment  $\sim 500 \text{ pb}^{-1}$  integrierte ep Luminosität mit guten Detektorbedingungen aufnehmen, etwa  $300 \text{ pb}^{-1}$  in Positron-Protonkollisionen und  $200 \text{ pb}^{-1}$  in Elektron-Protonkollisionen, zusammen fast eine Milliarde ep-Streureaktionen<sup>1</sup>. Weitere Details der in den verschiedenen Datenperioden genommenen Luminositäten sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die abschließende Datennahme im ersten Halbjahr 2007 hat dazu folgendermaßen beigetragen. Der HERA Betrieb in 2007 schloss nahtlos an das sehr erfolgreiche Jahr 2006 an. Bis Ende März lief HERA im normalen Hochenergiebetrieb mit Protonen mit einer Energie von 920 GeV und Positronen von 27.6 GeV. In diesem Zeitraum konnte das ZEUS Experiment  $40 \text{ pb}^{-1}$  inte-

		Luminosität [ $\text{pb}^{-1}$ ]	
		$e^+p$	$e^-p$
HERA I	1992–2000 unpolarisierte Elektronen	120	19
HERA II	2003–2007 polarisierte Elektronen	180	190

Tabelle 3: Vom ZEUS Detektor in den HERA Hochenergie-Runs (mit Protonenergien von 820 GeV oder 920 GeV) aufgezeichnete integrierte Luminositäten.

<sup>1</sup>Im folgenden wird der Begriff Elektronen übergreifend für Elektronen und Positronen verwendet, außer es kommt auf die Unterscheidung an.

grierte Luminosität aufzeichnen. Zur Erweiterung des Messprogrammes wurde HERA in den letzten drei Monaten mit verringerten Protonenergien betrieben. ZEUS konnte etwa  $13 \text{ pb}^{-1}$  gute Daten bei 460 GeV Protonenergie aufnehmen und knapp  $8 \text{ pb}^{-1}$  bei 575 GeV. Der gesamte Betrieb von HERA in 2007 verlief bis auf einige Ausfallperioden weitgehend störungsfrei und mit guten Strahlbedingungen.

Das ZEUS Experiment lief bis zum Schluss von HERA mit ausgezeichneter Datennahmeeffizienz, die 2007 im Mittel etwas über 90% lag. Der Detektor zeigte keine größeren Ausfalls- oder Alterserscheinungen, alle wesentlichen Komponenten konnten weitgehend problemlos betrieben werden.

### Abbau des ZEUS Detektors

Bereits einen Monat nach Ende der Datennahme, im August 2007, wurde mit dem systematischen Abbau des ZEUS Experiments begonnen. Ziel dieser Maßnahme ist es, den Experimentaufbau bis Ende 2008 vollständig zu entfernen. Dabei können große Teile des Experiments wiederverwendet werden. Einige besonders eindrucksvolle Komponenten sollen als Ausstellungsstücke dienen. Zum Beispiel wird die zentrale Spurkammer im *Science Museum* im Zentrum von London ausgestellt und eine Hälfte des Mikrovertexdetektors wird als Exponat im Eingangsbereich des *Nationaal instituut voor subatomaire fysica* in Amsterdam verwendet.

Aufgrund dieser Tatsache muss auch beim Abbau mit großer Sorgfalt vorgegangen werden, um die wiederverwertbaren Komponenten nicht zu beschädigen. Abbildung 36 zeigt wie eine der großen Myonkammern im Vorwärtsbereich des ZEUS Detektors herausgezogen wird. Der Abbau des Uran-Szintillator Kalorimeters stellt eine besondere Herausforderung dar. Das Kalorimeter wird in einzelne Module zerlegt und jeweils bis zu drei Module werden in Standardcontainern zum Transport verpackt. Da das enthaltene abgereicherte Uran vom *US Department of Energy* ausgeliehen war, müssen die Module wieder in die USA zurücktransportiert werden. Mit dieser Maßnahme wird im März

2008 begonnen und sie wird über einen Zeitraum von fast vier Monaten andauern. Im Anschluss werden die inneren Komponenten, die Spurkammern, der Mikrovertexdetektor und das zentrale Strahlrohr entfernt. Als letzter Schritt wird das 2000 t schwere Eisenjoch zerschnitten und verschrottet. Der Abbau soll gegen Ende des Jahres 2008 abgeschlossen sein.

### Datenverarbeitung

Auch in 2007 konnte die Rechenleistung für Rekonstruktion, Simulation und Analyse der Daten bei ZEUS wieder deutlich gesteigert werden. Hier sei nur erwähnt, dass die für die Daten-Korrekturen benötigten simulierten Ereignisse in einer neuen Rekordmenge produziert wurden: 581 Millionen im Vergleich zu 429 Millionen in 2006. Die *Gridsite Facility*, über die in den letzten Jahren schon berichtet wurde, hat einen stetig steigenden Anteil an dieser Produktion von zurzeit 80%.

### Physikalische Ergebnisse

Auch 2007 war wieder ein überaus fruchtbares Jahr bezüglich neuer Physikergebnisse des ZEUS Experimentes. Insgesamt 13 Analysen konnten publiziert werden. Über 25 neue *preliminary measurements* wurden auf internationalen Fachtagungen vorgestellt, darunter einige unter Verwendung der gesamten HERA Datenstatistik inklusive der neuen Daten in 2007. Im Folgenden soll nun eine Auswahl dieser Resultate präsentiert werden, angefangen von inklusiven ep Reaktionen bis zu Prozessen mit exklusiven Endzuständen wie schweren Quarks.

### Glossar

Die grundlegenden kinematischen Größen der ep-Streuung im Quark-Parton-Modell für den kinematischen Bereich von HERA sind in Abbildung 37 definiert.

Die Streuung des Elektrons an einem Quark im Proton wird durch drei kinematische Größen beschrieben:



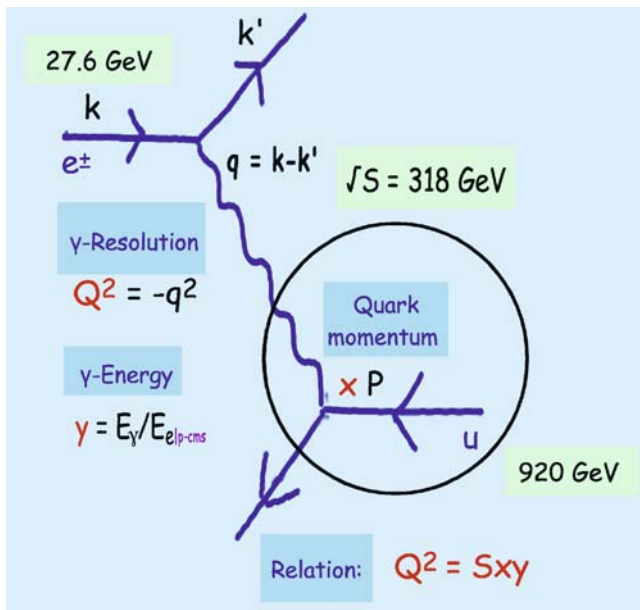


Abbildung 37: *ep-Streuung im Quark-Parton-Modell.*

Dem Quadrat des Viererimpulsübertrags  $Q^2$  des ausgetauschten Bosons, die Inelastizität  $y$ , d. h. den Anteil der Elektronenergie der vom Boson übernommen wird (im Protonruhesystem) und *Bjorken x*, den Anteil des Protonimpulses, den das Quark trägt. Nur zwei dieser Größen sind unabhängig. Die dritte ist bestimmt durch die Relation  $Q^2 = sxy$ , wobei  $\sqrt{s}$  die Schwerpunktsenergie des ep Systems ist. Es werden folgende Abkürzungen verwendet:

**Parton** Synonym für ein Quark oder Gluon

**DIS** (*deep inelastic scattering*) ep-Streuung mit einem  $Q^2$  von mindestens einigen  $\text{GeV}^2$

**Photoproduktion** ep-Streuung bei der das ausgetauschte Photon quasireell ist, d. h.  $Q^2 \sim 0 \text{ GeV}^2$

**NC** (*neutral current*) das ausgetauschte Boson ist ein Photon oder Z-Boson

**CC** (*charged current*) das ausgetauschte Boson ist ein W-Boson

**PDF** (*Parton Distribution Functions*) Parametrisierungen der Teilchendichten von Quark und Gluonen in einem Hadron, wird hier vorwiegend für das Proton verwendet

**NLO** (*Next-to-Leading Order*) Berechnung der Störungsreihe der QCD eine Ordnung (in der Kopplungskonstanten  $\alpha_s$ ) höher als die führende Ordnung der gegebenen Reaktion

### Suche nach neuer Physik

Mit der ep-Schwerpunktsenergie von 318 GeV bietet der HERA Collider gute Möglichkeiten nach *neuer Physik jenseits des Standardmodells* wie zum Beispiel nach neuen schweren Teilchen an der Hochenergiegrenze zu suchen. Eine geeignete experimentelle Signatur sind höchstenergetische Elektronen und Myonen, die in vielen Szenarien neuer Physik in Raten auftreten, welche diejenige aus Standardmodellprozessen bei weitem übertreffen können. Um eine solche potenzielle aufregende Entdeckung nicht zu verpassen, haben die beiden Experimente ZEUS und H1 innerhalb kürzester Zeit die gesamten von HERA angelieferten Daten nach Ereignissen mit solchen Leptonkandidaten untersucht und ihre Ergebnisse kombiniert. Abbildung 38 zeigt als Beispiel die Verteilung der invarianten Masse von

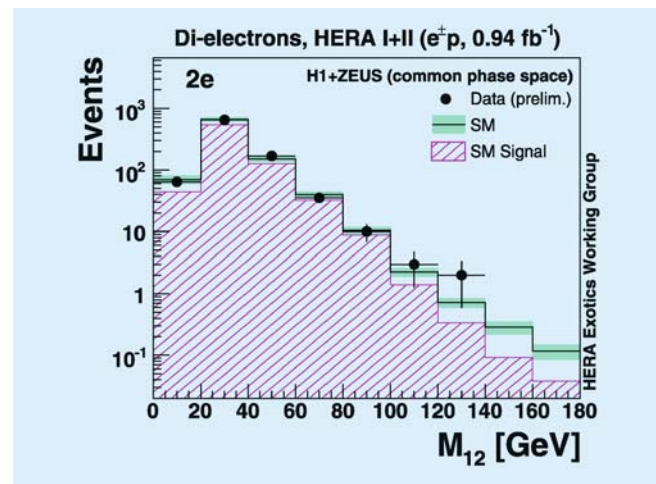


Abbildung 38: *Gemeinsame Analyse von ZEUS und H1 von höchstenergetischen Elektronenpaaren in der gesamten bei HERA aufgezeichneten Datenmenge. Die Verteilung der invarianten Masse der Paare in den Daten ist mit den Vorhersagen von Standardmodellprozessen verglichen (Signal bezeichnet die Prozesse mit echten Elektronenpaaren).*

Elektronpaaren in der kombinierten Datenmenge von  $\sim 1\text{fb}^{-1}$  integrierte Luminosität. Zusammenfassend gesagt wurden weder in dieser noch in anderen solcher Verteilungen in Analysen mit einzelnen oder mehreren Elektronen und/oder Myonen signifikante Abweichungen von den vorhergesagten Raten aus Standardmodellprozessen gefunden. Daraus ergeben sich erhebliche Einschränkungen für viele Modelle neuer Physik. Weitere Datenanalysen, die zurzeit stattfinden wie zum Beispiel die Suche nach neuen Bindungszuständen aus Quarks und Elektronen, den Leptoquarks, werden zeigen ob vielleicht doch noch Anzeichen für neue Physik in den HERA Daten zu finden sind.

Die inklusive ep-Streuung bei HERA mit longitudinal polarisierten Elektron- oder Positronstrahlen bietet faszinierende Möglichkeiten, den *elektroschwachen Sektor* des Standardmodells zu testen. Abbildung 39 zeigt neue ZEUS Messungen der NC Wirkungsquerschnitte als Funktion von  $Q^2$ . Diese Messungen nutzen die gesamten bei HERA II in den Jahren 2004–2006 aufgenommenen  $e^-p$  Daten. Die Resultate sind getrennt gezeigt für Daten mit positiver und negativer longitudinaler Elektronpolarisation. Der steile Abfall der Wirkungsquerschnitte mit  $Q^2$  ist im Wesentlichen durch die *Rutherfordstreuung*  $\sim 1/Q^4$  der Elektronen an den Quarks in den Protonen zu erklären. An der unteren  $Q^2$  Grenze der Daten ist der Austausch von Photonen dominant, zu höheren  $Q^2$  trägt der Z-Austausch signifikant bei. Die Tatsache dass das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für die zwei verschiedenen Polarisationen von *eins* abweicht ist ein klarer Hinweis auf Paritätsverletzung, die hier zum ersten Mal in einem Experiment mit raumartigen Auflösungen bis hinunter zu  $10^{-18}\text{m}$  beobachtet wird. Dieser Effekt wird im Standardmodell erklärt durch paritätsverletzende Terme die hauptsächlich in der Interferenz zwischen dem Photon und dem Z-Austausch auftreten. Die in der Abbildung 39 gezeigte Standardmodellvorhersage *SM (ZEUS-Jets)* beschreibt die Daten hervorragend. Vor allem bei höchsten Impulsüberträgen  $Q^2$  sind die Daten sensitiv auf eine mögliche räumliche Ausdehnung der Quarks, die sich über einen Formfaktor als zusätzliche Abschwächung der Wirkungsquerschnitte mit  $Q^2$  bemerkbar machen würde. Aus den Daten ist eine solche

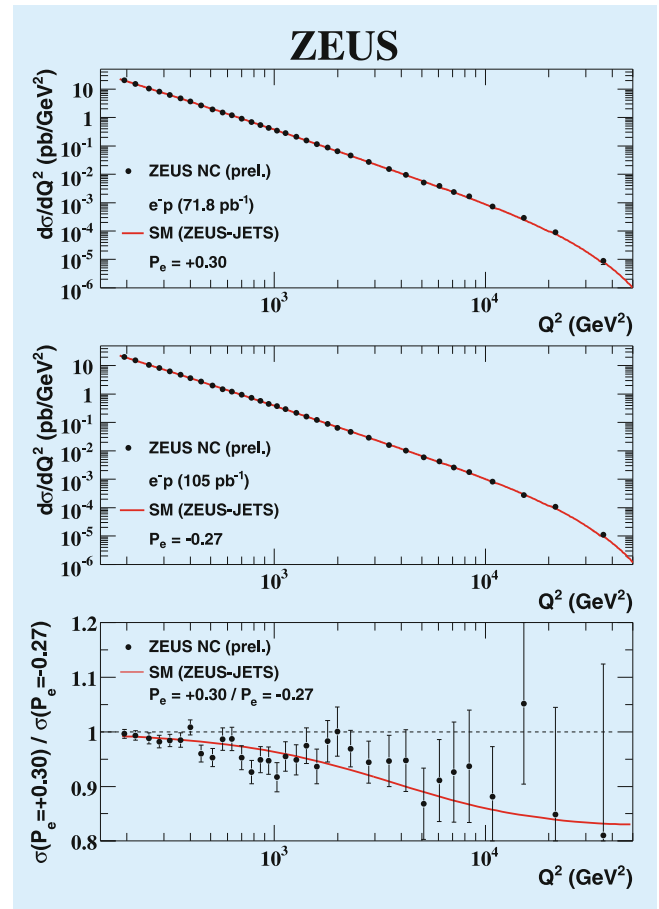


Abbildung 39: Wirkungsquerschnitte  $d\sigma/dQ^2$  für Wechselwirkungen des neutralen Stroms in der  $e^-p$ -Streuung für (oben) positive und (mitte) negative mittlere Elektronpolarisierung und (unten) das Verhältnis der beiden. Die Vorhersagen des Standardmodells sind als durchgehende Kurven gezeigt.

Abschwächung nicht zu ersehen. Aus der Analyse eines großen Teils aller HERA  $e^\pm p$ -Daten wurde eine Obergrenze für den möglichen Quarkradius bestimmt zu  $r_Q > 0.62 \cdot 10^{-18}\text{m}$  (mit 90% Konfidenz).

Im Standardmodell koppeln die geladenen Ströme nur an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen. Deshalb erwartet man eine direkt proportionale Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte von der Polarisation der Strahlelektronen. Dieser maximal paritätsverletzende Effekt wird sehr schön bei HERA beobachtet (siehe Abbildung 40). ZEUS konnte dazu einen neu-

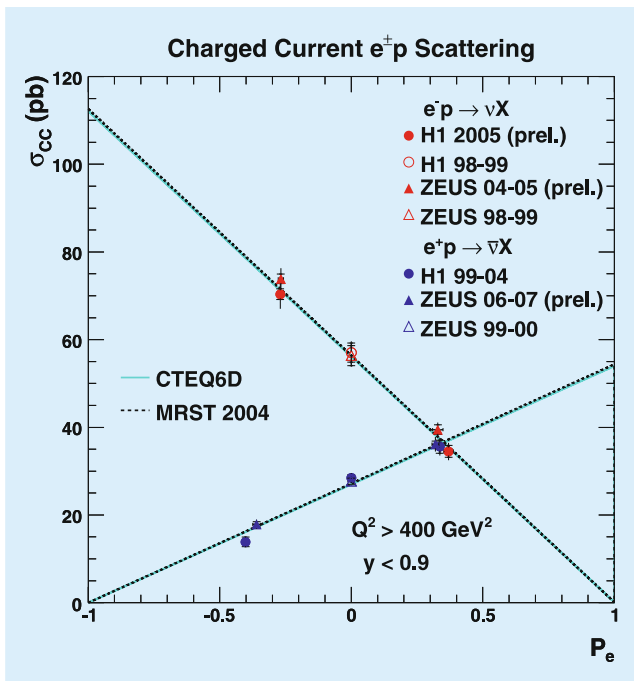


Abbildung 40: Totaler Wirkungsquerschnitt für Wechselwirkungen des geladenen Stroms in  $e^+p$ - und  $e^-p$ -Streuungen, in Abhängigkeit vom mittleren Polarisationsgrad der Elektronen. Die ZEUS und H1 Messungen sind mit Linien verglichen, welche die Standardmodellvorhersage zeigen (mit zwei verschiedenen Proton PDFs “CTEQ6D” und “MRST2004”).

en präzisen Punkt ZEUS 06-07 (prel.) beisteuern, für den die gesamte Statistik der in 2006 bis 2007 aufgezeichneten  $e^+p$  Daten verwertet wurde. In den Daten sind keinerlei signifikante Abweichungen von der Standardmodellvorhersage zu sehen.

## Protonstruktur aus inklusiven Messungen

Neutrale und geladene Ströme sind direkt sensitiv auf die Quarkdichten im Proton. Die Analyse der inklusiven tiefunelastischen Lepton-Nukleon Streuung, bei der nur gezählt wird wie häufig das Strahllepton in einen bestimmten Winkelbereich mit einer bestimmten Energie gestreut wird (woraus man  $Q^2$  und  $x$  eindeutig bestimmen kann), hat historisch gesehen die meisten In-

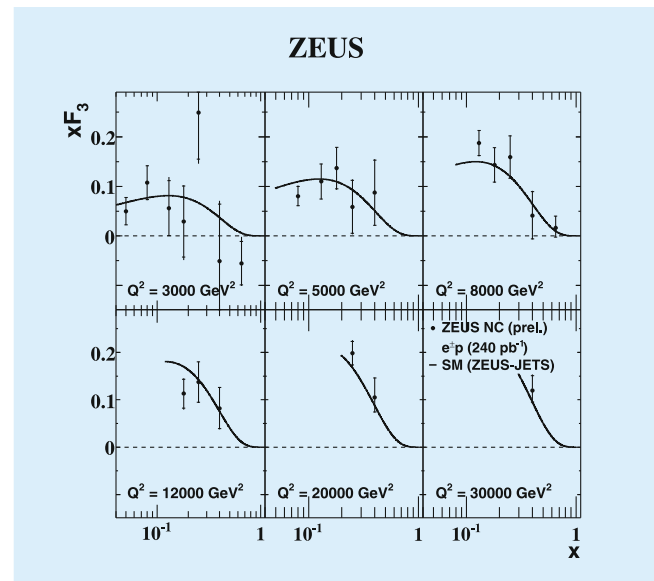


Abbildung 41: Strukturfunktion  $xF_3$ , gezeigt als Funktion von  $x$  für verschiedene  $Q^2$  Bereiche. Die ZEUS Daten sind mit einer Standardmodellvorhersage verglichen.

formationen über die Dichten von Quarks und Gluonen im Proton erbracht. Der Photonaustausch in den neutralen Strömen alleine ist allerdings blind gegenüber dem Vorzeichen der elektrischen Ladung der Quarks und erlaubt es damit nicht, zwischen Valenz- und Seequarks direkt zu unterscheiden. Einen Ausweg bietet hier der Austausch eines Z-Bosons der bei HERA kinematisch zugänglich ist. Der Interferenzterm zwischen Photon- und Z-Austausch wechselt sein Vorzeichen, wenn man von Elektronen zu Positronen als Strahlleptonen wechselt. Dies erlaubt einen einzigartigen direkten Zugriff auf die Valenzquarkdichten  $u_v$  und  $d_v$  mittels der Strukturfunktion  $xF_3 \propto \sigma_{NC}^{e^+p} - \sigma_{NC}^{e^-p} \propto 2u_v + d_v$ . Abbildung 41 zeigt neueste ZEUS Ergebnisse die erheblich präziser sind als frühere, weil die Statistik der  $e^-p$  Daten bei HERA II um einen Faktor 10 gegenüber HERA I gesteigert werden konnte.

ZEUS und H1 haben im Jahr 2007 ihre früheren inklusiven HERA I Messungen von neutralen und geladenen Strömen kombiniert. Dazu wurde eine Methode gewichteter Mittelwerte verwendet, bei der gleichzeitig Parameter mitbestimmt wurden, wie z. B. die Energie-

skalen in den Kalorimetern, die experimentelle systematische Unsicherheiten repräsentieren.

Es konnte dadurch eine wechselseitige Kalibration mit deutlich reduzierten systematischen Unsicherheiten der ZEUS und H1 Detektoren erzielt werden. Die entsprechenden NC Resultate sind in Abbildung 42 als reduzierte Wirkungsquerschnitte gezeigt. Diese sind über weite Bereiche in  $Q^2$  und  $x$  identisch mit der Strukturfunktion  $F_2$  die im Quark-Parton-Modell direkt mit der Summe der Quark- und Antiquarkdichten im Proton verknüpft ist. Die beobachtbaren Skalenverletzungen des reduzierten Wirkungsquerschnittes, d. h. die Abhängigkeit bei festem  $x$  von der Auflösungsskala  $Q^2$ , kann man mit Effekten von Gluonabstrahlungen  $q \rightarrow qg$ ,  $g \rightarrow gg$  und Paarerzeugung  $g \rightarrow q\bar{q}$  im Proton erklären, die bei großen  $x$  ( $> 0.1$ ) zu einer Verkleinerung der Valenzquarkdichten im Proton führen und bei

kleinen  $x$  zu einer Vergrößerung der hier dominanten Seequarkdichten. Von der QCD Analyse der kombinierten Daten ist ein erheblich verbessertes Verständnis der Dichten von Quarks und Gluonen im Proton zu erwarten.

Die bislang betrachteten inklusiven ep Wirkungsquerschnitte sind nur indirekt sensitiv auf die Gluondichte über die diskutierten Skalenverletzungen. Einen direkteren Zugang erhält man über die Strukturfunktion  $F_L$ , welche die Streuung longitudinal polarisierter Photonen beschreibt. Diese Photonen können nicht an Quarks im Proton ankoppeln die wie im Quark-Parton-Modell parallel zum Proton laufen, wohl aber an solche die aus  $g \rightarrow q\bar{q}$  stammen und einen Transversalimpuls zum Proton haben. Der  $F_L$  Beitrag im reduzierten NC Wirkungsquerschnitt ist helizitätsunterdrückt. Er trägt nur dann signifikant bei, wenn das Proton einen großen Teil der Elektronenergie übernimmt, d. h. bei großen  $y$  (vergleiche Abbildung 37). Die in den letzten drei Monaten der HERA Laufzeit genommenen Daten mit niedriger Protonenergie dienen im Wesentlichen dazu, eine direkte Messung von  $F_L$  zu ermöglichen. Dazu muss man in diesen Daten bei möglichst hohem  $y$  messen. Als eine vorbereitende Messung hat ZEUS die reduzierten NC Wirkungsquerschnitte in den HERA II Hochenergiedaten in einem erweiterten  $y$  Bereich gemessen. Das gestreute Elektron wurde bis zu kleinen Energien von 5 GeV identifiziert. Das ist eine experimentelle Herausforderung, weil der Untergrund von misidentifizierten Elektronkandidaten aus Photoproduktionsereignissen bei kleinen Elektronenergien sehr groß ist. In diesen Ereignissen läuft das wahre gestreute Elektron unerkant im Strahlrohr weiter. Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 zu sehen. Diese zeigt das Verhältnis der Daten zu einer QCD Vorhersage. Es ist klar zu sehen, dass in vielen  $Q^2$  Bereichen höhere  $y$  erreicht wurden als in der ebenfalls gezeigten älteren Messung mit HERA I Daten.

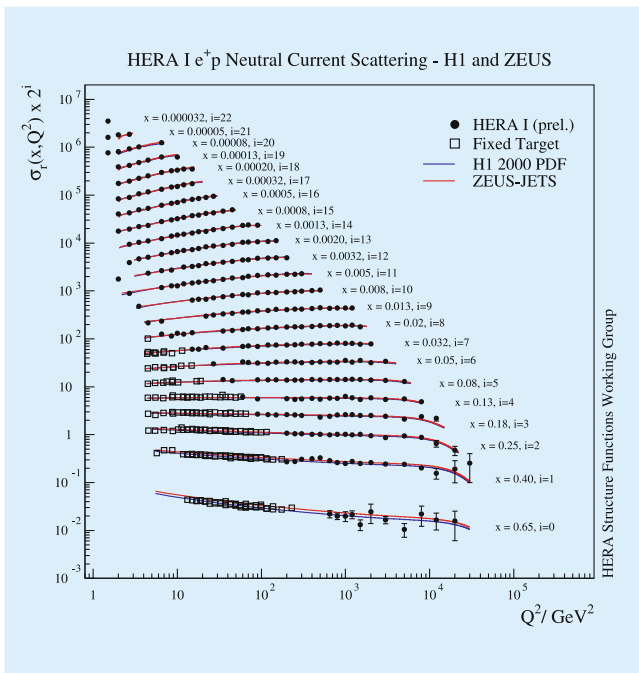


Abbildung 42: ZEUS und H1 kombinierte reduzierte NC Wirkungsquerschnitte HERA I (prel), basierend auf publizierten HERA I Daten, als Funktion von  $Q^2$  für verschiedene Werte von  $x$ . Die Resultate früherer Fixed Target Experimente sind ebenfalls dargestellt. Die Kurven zeigen NLO QCD Anpassungen von ZEUS und H1 an ihre separaten Daten.

## Produktion von zwei Jets

Quarks und Gluonen, die mit großen Impulsen aus der harten Streuung kommen, fragmentieren typischerwei-

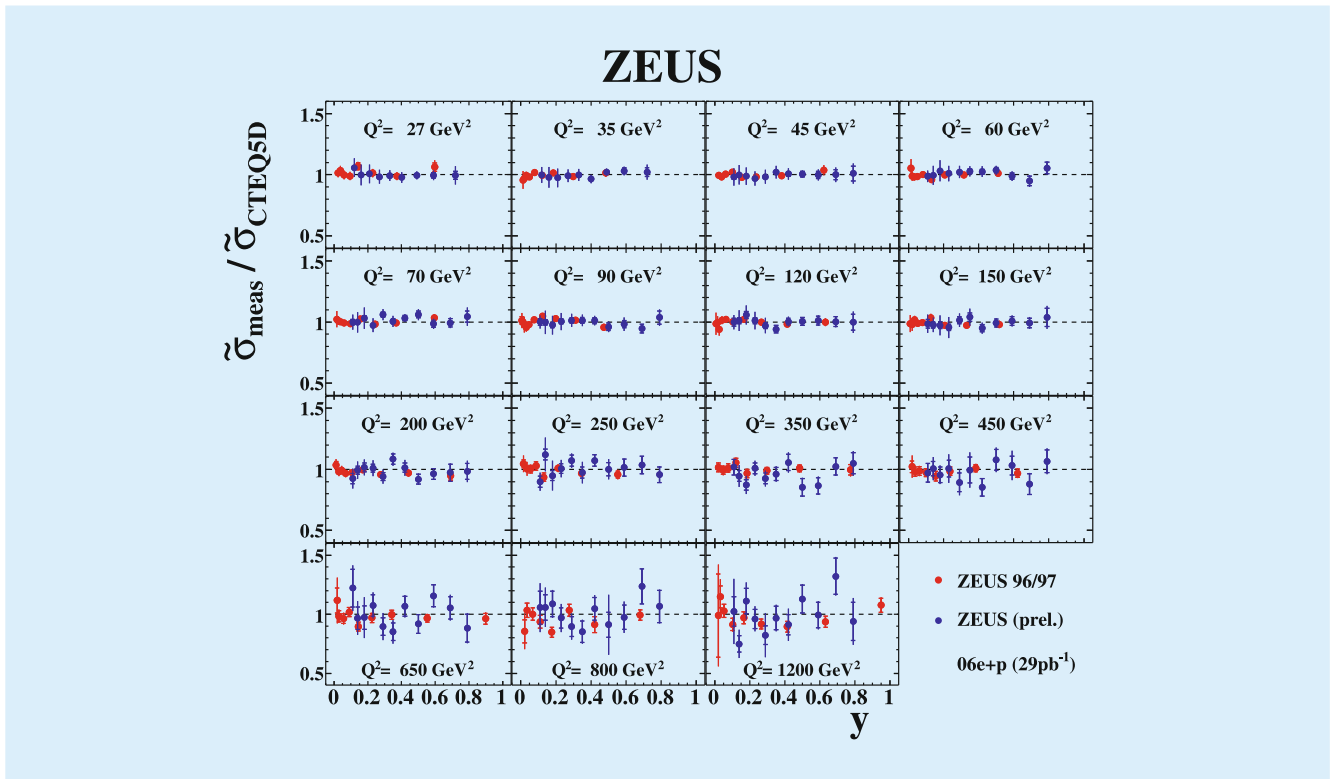


Abbildung 43: Reduzierte NC Wirkungsquerschnitte für verschiedene  $Q^2$  als Funktion von  $y$ , geteilt durch eine QCD Vorhersage. Gezeigt sind zwei ZEUS Messungen: eine neue ZEUS (prel.) mit HERA II Daten und eine ältere basierend auf HERA I Daten.

se als kollimierte Bündel von Hadronen, den sogenannten Jets, die im Detektor nachgewiesen werden können. Ereignisse mit zwei Jets bei HERA sind über weite kinematische Bereiche durch den Boson Gluon Fusion (BGF) Prozess dominiert (siehe Abbildung 44 links). Dies ermöglicht einen direkten Zugang zur Gluondichte im Proton. ZEUS hat in diesem Jahr eine Messung von Ereignissen mit zwei hochenergetischen Jets in Photoproduktion veröffentlicht. In Photoproduktion erwartet man neben dem direkten BGF Prozess auch signifikante Beiträge von Reaktionen, bei denen das Photon zunächst in ein  $q\bar{q}$ -Paar fluktuiert, das sich dann in Zeit und Raum wie ein Hadron weiterentwickelt. Ein Parton aus dieser Fluktuation nimmt dann an der harten Wechselwirkung teil (siehe Abbildung 44 rechts). Aus den Winkeln und den Transversalenergien der zwei Jets und dem Rest des Ereignisses kann man die Größe  $x_\gamma$  berechnen, die den Photonimpulsbruchteil charakterisiert,

den dieses Parton trägt. Die Verteilung der Wirkungsquerschnitte als Funktion von  $x_\gamma$  erlaubt Einblicke in die Struktur des aufgelösten Photons. Abbildung 45 zeigt

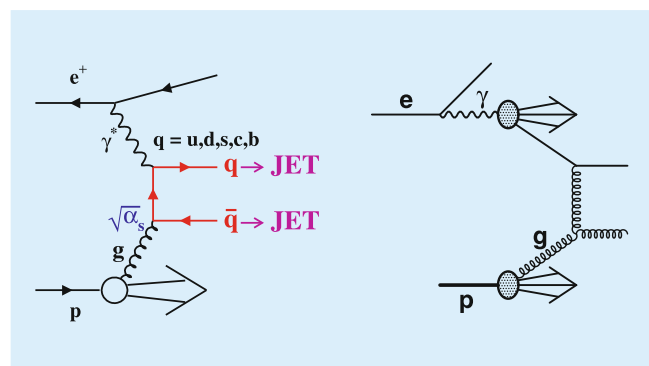


Abbildung 44: (Links) Direktes Boson Gluon Fusion Diagramm für Zweijetproduktion und (rechts) ein beispielhaftes Diagramm mit einem aufgelösten Photon.



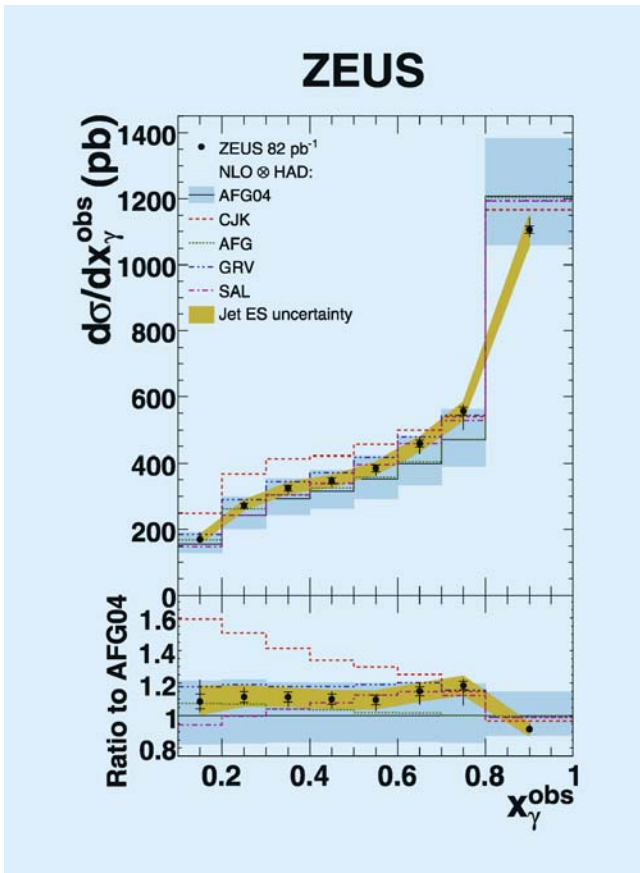


Abbildung 45: Gemessene Wirkungsquerschnitte für Photoproduktion von Zweijets als Funktion der Observablen  $x_\gamma$ . Die ZEUS Daten sind mit NLO QCD Vorhersagen verglichen die mit verschiedenen Strukturfunktionen für das aufgelöste Photon erzielt wurden. Im unteren Teil ist das Verhältnis der Ergebnisse zu einer der Vorhersagen dargestellt.

die gemessenen Wirkungsquerschnitte zusammen mit NLO QCD Vorhersagen, die mit verschiedenen Photonstrukturfunktionen gemacht wurden. Man erkennt deutlich, dass die Daten in der Lage sind, zwischen diesen Vorhersagen zu unterscheiden und damit wertvolle Hinweise auf die Struktur des Photons zu geben.

### Produktion schwerer Quarks

Die Produktion von Charm-(c)- und Beauty-(b)-Quarks bei HERA ist ebenfalls durch den BGF Prozess (siehe

Abbildung 44) dominiert. Die große Masse der c- und b-Quarks liefert eine harte kinematische Skala, die dafür sorgt, dass die Kopplungskonstante der starken Kraft  $\alpha_s$  genügend klein ist, so dass man QCD Störungstheorie anwenden kann. Wie schon in früheren Jahresberichten diskutiert, wurde der ZEUS Detektor für HERA II für verbesserte Charm und Beautymessungen erheblich aufgerüstet. Das Spurkammersystem wurde mit *Mikrovertexdetektoren* ergänzt, die es erlauben, die Ortsposition geladener Teilchen in der Nähe der ep Wechselwirkung sehr präzise zu bestimmen. Dies ermöglicht es, die schweren Quarks über ihre lange Lebensdauer zu identifizieren, d. h. die sekundären Zerfälle von Charm- und Beauty-Hadronen zu rekonstruieren. Methoden und Signale wurden bereits in den vergangenen Jahresberichten ausführlich diskutiert – an dieser Stelle soll über erste Physikergebnisse berichtet werden. In 2007 hat ZEUS mit verschiedenen untersuchten D-Mesonen eine umfassende Analyse der Strukturfunktion  $F_2^{cc}$  durchgeführt (siehe Abbildung 46).  $F_2^{cc}$  greift den Teil der Protonstrukturfunktion  $F_2$  heraus, der durch Ereignisse mit Charmquarks im Endzustand zustandekommt. Dieser Anteil erreicht bei HERA bis zu 30% was auf die Dominanz der BGF Prozesse in DIS bei kleinen  $x$  zurückzuführen ist. Besonders bemerkenswert bei den neuen ZEUS Resultaten sind die Messungen mit  $D^+$  Mesonen, die im Zerfallskanal  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  vollständig rekonstruiert wurden. Durch die Identifizierung des dazugehörigen Sekundärvertex konnten Untergrundprozesse stark unterdrückt und zum ersten Mal eine sehr gute statistische Signifikanz erzielt werden, vergleichbar mit der für den bis dato fast ausschließlich genutzten *goldenen Zerfall*  $D^{*+} \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ . Die  $F_2^{cc}$  Resultate sind in Abbildung 46 mit zwei NLO QCD Vorhersagen verglichen. Die beiden Vorhersagen unterscheiden sich deutlich im Bereich kleiner  $x$ , wo die Gluondichte nicht so gut bekannt ist. Die HERA Charm Daten haben genügend Präzision, um hier zu einem besseren Verständnis zu gelangen.

In 2007 konnte ZEUS zum ersten Mal Ergebnisse für die Strukturfunktion  $F_2^{bb}$  präsentieren. Die Resultate wurden mit einem kleinen Teil der HERA II Statistik erzielt. Für die Identifizierung der relativ seltenen Be-

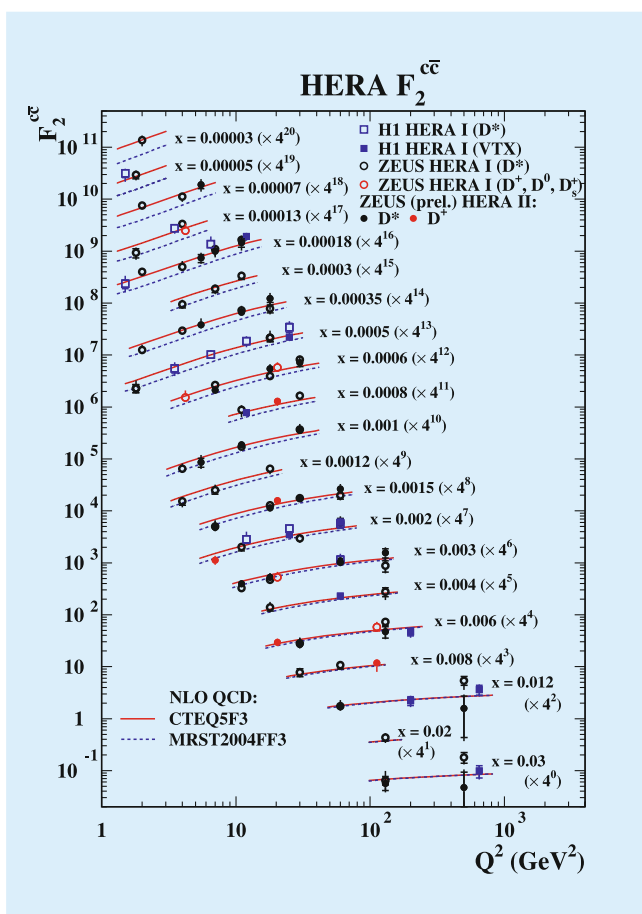


Abbildung 46: Resultate von ZEUS und H1 für die Beiträge von Charm Ereignissen zur Strukturfunktion  $F_2$ , der Observablen  $F_2^{cc}$ , im Vergleich mit QCD Vorhersagen.

auty Quarks wurden Ereignisse mit Myonen und einem assoziierten Jet im Endzustand ausgewählt. Das Beauty Signal wurde dann aus der Verteilung des Myontransversalimpulses relativ zur Jetachse bestimmt. Die  $F_2^{bb}$  Ergebnisse sind in Abbildung 47 gezeigt.  $F_2^{bb}$  ist allgemein sehr viel kleiner als  $F_2^{cc}$ , außer bei den höchsten  $Q^2$ -Werten. Dies ist auf die kleinere elektrische Ladung des b-Quarks zurückzuführen sowie auf kinematische Schwelleneffekte durch die große b-Quarkmasse. Durch die Analyse der vollen Datenstatistik wird es möglich sein, die Präzision der ZEUS  $F_2^{bb}$  Messungen noch erheblich zu steigern. Ein genaueres Verständnis der b-Quarkproduktion in DIS ist auch wichtig für viele Vorhersagen von Prozessen am LHC bei denen

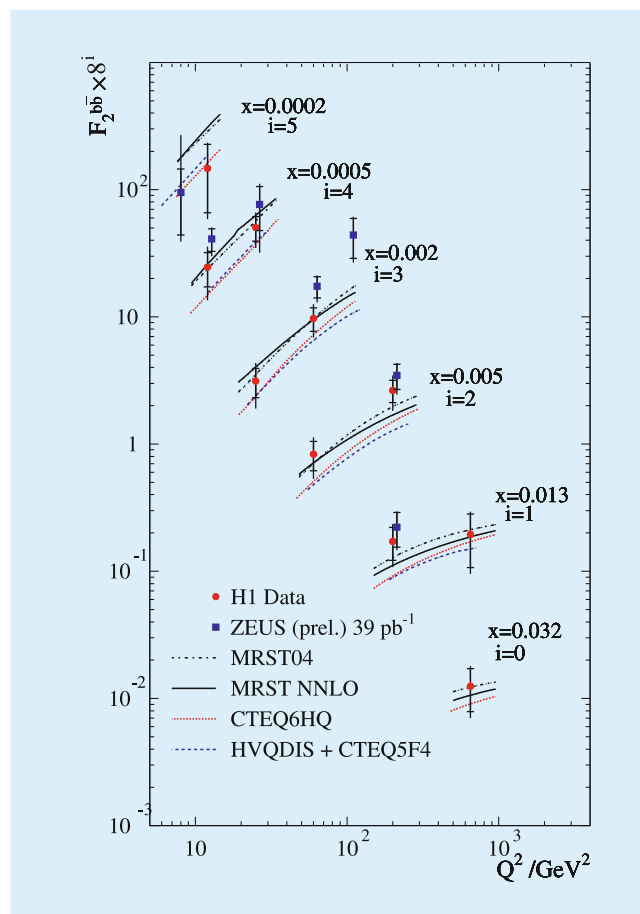


Abbildung 47: Resultate von ZEUS und H1 für die Beiträge von Beauty Ereignissen zur Strukturfunktion  $F_2$ , der Observablen  $F_2^{bb}$ , im Vergleich mit QCD Vorhersagen.

b-Quarks involviert sind wie zum Beispiel Higgsproduktion in der Reaktion  $b\bar{b} \rightarrow H$ .

## Diffraktion

Hadron-Hadron Streuungen sind durch *weiche Wechselwirkungen* dominiert. Bei einem wesentlichen Teil der Ereignisse bleibt mindestens eines der beiden Hadronen intakt. Diesen Prozess bezeichnet man als *Diffraktion*. Die zu Grunde liegende partonische Natur der diffraktiven Wechselwirkung ist nur unzulänglich bekannt.

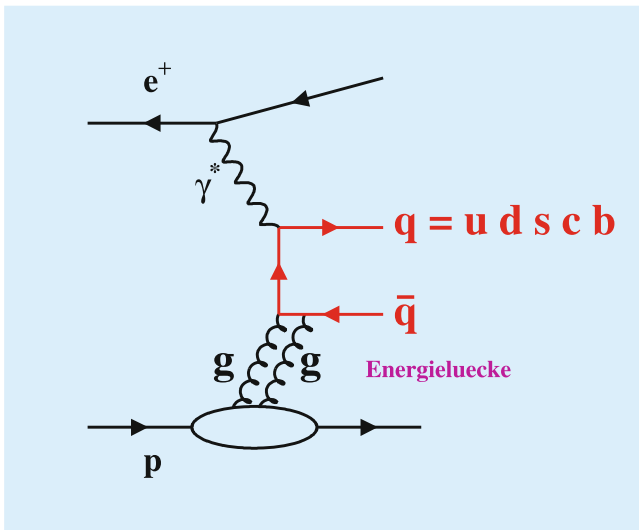


Abbildung 48: *Diffraktion durch den farblosen Austausch zweier Gluonen.*

Eine wichtige Entdeckung bei HERA ist der mit einer Größenordnung von nahezu 10% überraschend große Anteil von diffraktiven Streuprozessen  $ep \rightarrow epX$ , bei dem das Proton intakt bleibt, obwohl man es mit einem tiefvirtuellen Boson beschossen hat. Experimentell identifiziert man diffraktive Ereignisse bei HERA entweder über den Nachweis des gestreuten Protons in speziellen Vorwärts-Spektrometern nahe dem Strahlrohr oder über Eigenschaften des im Zentraldetektor beobachteten hadronischen Systems, z. B. durch den Nachweis einer sogenannten großen Energilücke. Im Rahmen der QCD kann man diesen Prozess durch den Austausch von zwei Gluonen beschreiben, die sich in einem „farblosen“ Zustand befinden wie in Abbildung 48 dargestellt. Dieses Diagramm beschreibt allerdings nur den einfachsten von einer Vielzahl möglicher Prozesse dieser Art bei HERA.

Wie von J. Collins bewiesen, kann man die Wirkungsquerschnitte für diffraktive  $ep$  Streuung in DIS faktorisieren in universelle diffraktive Partonverteilungsfunktionen (DPDFs) des Proton und prozessabhängige Koeffizienten für den harten partonischen Streuprozess (siehe Abbildung 49). Die Faktorisierung erlaubt es einem auf elegante Art Vorhersagen zu berechnen; es ist daher eine interessante Frage inwieweit man diesen Ansatz auch für andere diffraktive Prozesse benutzen

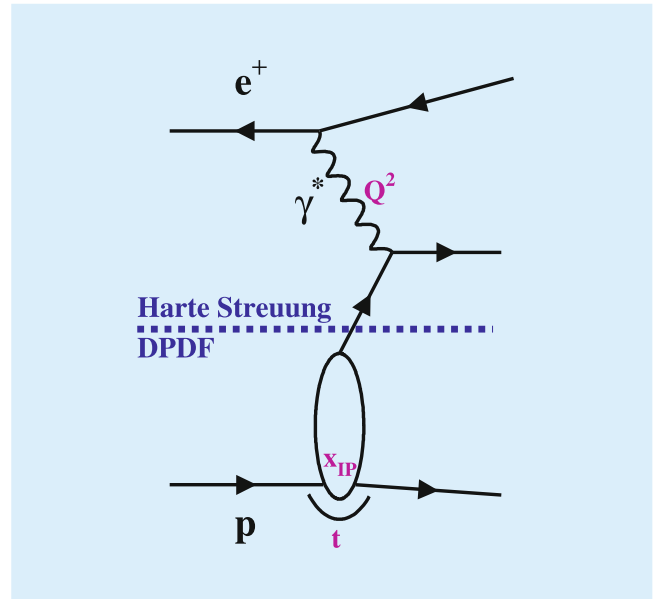


Abbildung 49: *Faktorisierung diffraktiver DIS Prozesse in zwei unabhängige Teile: diffraktive Protonstruktur (DPDF) und harte Streuung.*

kann. Ein weitgehendes Versagen wurde für die diffraktive Produktion von zwei Jets in  $p\bar{p}$  Kollisionen am Tevatron beobachtet, wo die experimentellen Raten einen Faktor  $\sim 10$  unter den entsprechenden Vorhersagen liegen. Es wäre wünschenswert ein insgesamt besseres Verständnis der diffraktiven Prozesse zu erlangen, auch in Hinblick auf das LHC, wo es Hoffnungen gibt, dass man das Higgsboson relativ untergrundfrei in der diffraktiven Produktion  $pp \rightarrow ppH$  studieren kann. Auch darum ist es wichtig bei HERA, wo man eine „saubere“ elektromagnetische Probe (das Photon) mit variabler Auflösung  $Q^2$  hat, die Anwendbarkeit der Faktorisierung möglichst umfassend zu testen. ZEUS hat dazu in 2007 einen wesentlichen Beitrag geleistet mit der Veröffentlichung von drei Messungen die sich diesem Thema widmen. In diesen Messungen wurden Zweijet- und  $D^*$ -Endzustände untersucht, die insbesondere sensitiv auf die Gluondichten in den DPDFs sind. Abbildung 50 zeigt die Messung mit  $D^*$ -Mesonen in Photoproduktion als Funktion des Impulsanteils  $x_{IP}$  den das Proton in der diffraktiven Wechselwirkung verloren hat. Die Messungen stimmen gut mit der Theorievorhersage überein, die auf dem Faktorisierungsansatz

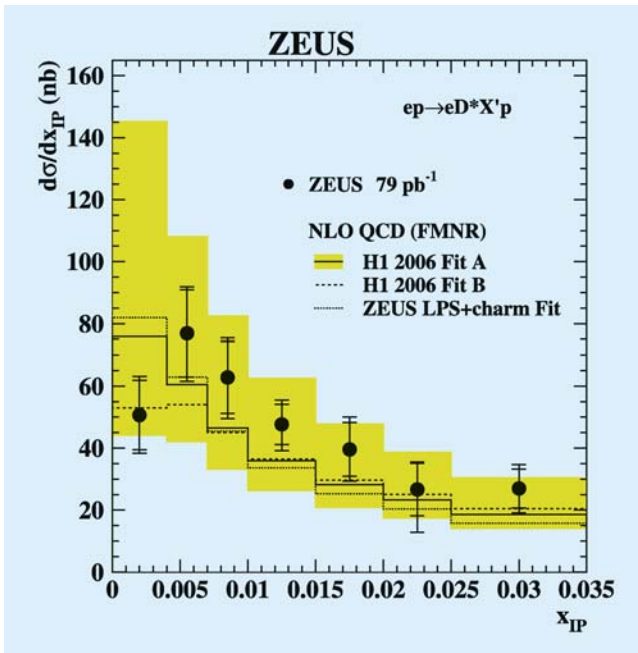


Abbildung 50: Wirkungsquerschnitte für diffraktive Photoproduktion von  $D^*$  Mesonen als Funktion des Impulsanteils  $x_{IP}$ , den das Proton in der diffraktiven Wechselwirkung abgegeben hat. Die ZEUS Daten sind mit einer Vorhersage verglichen die auf dem QCD Faktorisierungsansatz (siehe Text) beruht.

basiert. Die Daten haben eine deutlich größere Präzision als die der Theorievorhersage (deren Unsicherheit als Band gekennzeichnet ist). Für die Messungen mit Zweijets wurde beobachtet, dass die Raten in DIS wie erwartet eine gute Übereinstimmung mit der Faktorisierungshypothese zeigen. In Photoproduktion, wo man aus theoretischen Überlegungen eine Unterdrückung der Ereignisse mit aufgelösten Photonen erwartet, weil diese den rein hadronischen Wechselwirkungen am Tevatron ähneln, wird eine schwache Unterdrückung gesehen, die innerhalb der Fehler mit Null verträglich ist. Die deutlich stärkere Unterdrückung die man in einer vergleichbaren Analyse bei H1 gesehen hat, wird nicht bestätigt.

### Diffraktive Produktion von Vektormesonen

Die diffraktive Produktion von Vektormesonen bei HERA  $\gamma^*p \rightarrow Vp$  ist ein weiteres ausgezeichnetes Test-

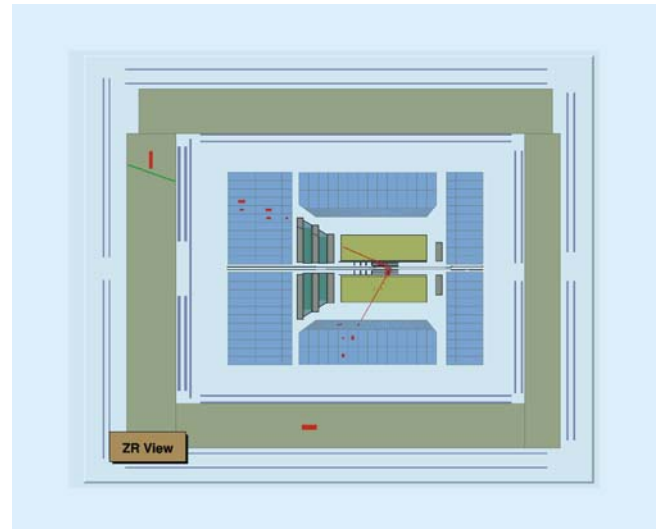


Abbildung 51: Ereigniskandidat für die diffraktive Produktion  $\gamma^*p \rightarrow \Upsilon p$  mit anschließendem Zerfall  $\Upsilon \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

gebiet der QCD. ZEUS konnte in 2007 neue Resultate für die Familie der mit Abstand schwersten Vektormesonen erzielen können, den Ypsilon-Resonanzen, die durch ihren Zerfall in zwei Myonen identifiziert wurden. Ein Beispiereignis ist in Abbildung 51 zu sehen. Man erkennt sehr schön, dass der Detektor bis auf die beiden Myonen vollkommen „leer“ ist, d. h. keine weiteren Signale zu finden sind – das gestreute Proton und das Elektron laufen in der Strahlröhre weiter. Der gemessene Impuls des Vektormesons erlaubt es, den Viererimpulsübertrag  $t$  auf das Proton zu bestimmen sowie die Energie des (einlaufenden) virtuellen Photons. Dies verschafft einem Information über den dreidimensionalen Aufbau des Protons. Abbildung 52 zeigt das Signal der relativ selten produzierten Ypsilon-mesonen in der gesamten HERA Datenmenge. Durch die Auswertung aller Daten ist es ZEUS zum ersten Mal gelungen, eine signifikante Messung der Abhängigkeit der Upsilon-Produktion von der Proton-Photonschwerpunktsenergie zu erreichen. Der beobachtete Anstieg mit der Energie (hier nicht gezeigt) ist sehr steil.

Eine weitere wichtige neue ZEUS Publikation in 2007 darf hier nicht unerwähnt bleiben: die Analyse diffraktiver  $\rho$ -Produktion in DIS. Das Studium der Produktion



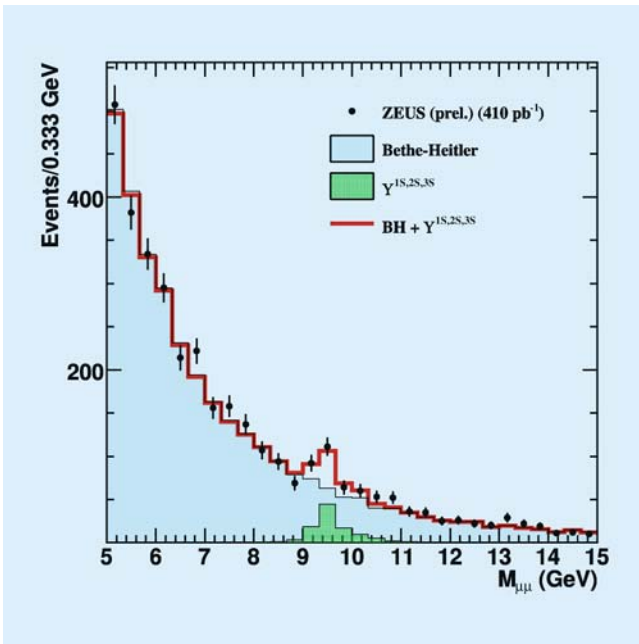


Abbildung 52: ZEUS  $\gamma$ -Signal in der invarianten Myon-Myon Massenverteilung, basierend auf der vollen HERA Datenstatistik.

dieser leichten Resonanz als Funktion verschiedener kinematischen Skalen ( $Q^2$ ,  $y$ ,  $t$ ) gewährt einen umfassenden Einblick in die Dynamik der diffraktiven Streuung.

### Fragmentationsstudien

Quarks und Gluonen treten nicht als *freie Teilchen* auf, sondern fragmentieren in Hadronen, die man im Experiment beobachten kann. Dieser Übergang von Partonen zu Hadronen entzieht sich bis heute einem detaillierten Verständnis und kann nur phänomenologisch beschrieben werden. Dabei nimmt man allgemein an, dass die Fragmentation eines Quarks oder eines Gluons unabhängig von seinem Produktionsmechanismus, d. h. universell ist. ZEUS hat die Gültigkeit dieser Annahme in einer Analyse der Impulsverteilung geladener Hadronen in DIS Ereignissen untersucht. Die Teilchenimpulse wurden im sogenannten *Breitruhesystem* ausgewertet. Dieses Ruhesystem ist so konstruiert, dass für Streuungen im Quark-Parton-Modell das wechselwirkende Quark um  $180^\circ$  zurückgestreut wird

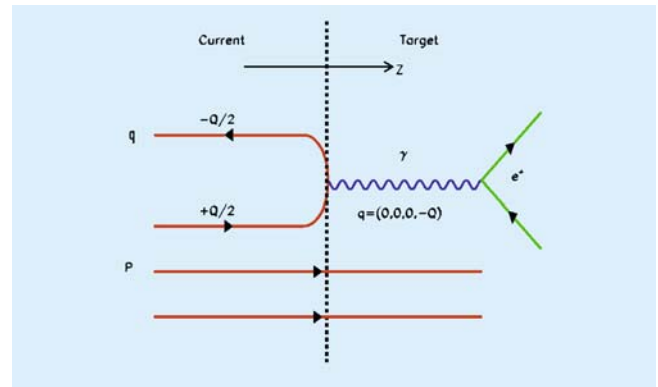


Abbildung 53: Quark-Parton-Modell Prozess bei HERA im Breitssystem. Man beachte die Ähnlichkeit des harten Streuprozesses mit Quark-Antiquarkproduktion in  $e^+e^-$  Annihilation.

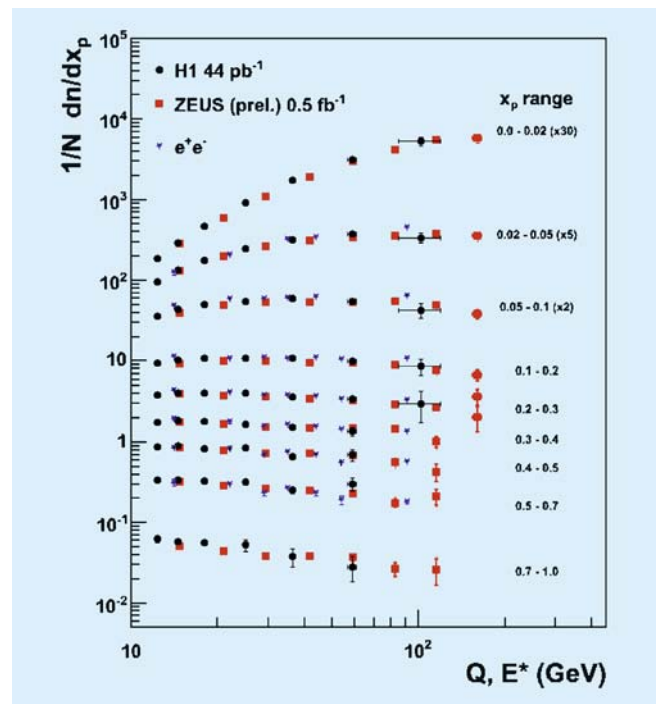


Abbildung 54: Resultate für die normalisierten Verteilungen der skalierten Impulse  $x_p$ . Die Messungen von ZEUS sind verglichen mit Resultaten von H1 und von  $e^+e^-$  Experimenten. Die Daten sind gezeigt in Bereichen von  $x_p$  als eine Funktion der Skala des ausgetauschten Bosons, die bei HERA durch  $Q$  gegeben ist und bei den  $e^+e^-$  Collidern durch die Schwerpunktsenergie  $E^*$ .

(siehe Abbildung 53). Der skalierte Impuls  $x_p = 2p/Q$  eines geladenen Teilchens, das aus diesem Quark fragmentiert, ist ein direktes Mass für den transferierten Impulsanteil. Die Verteilung von  $x_p$  kann mit dem Anteil der Quarkenergie, die in  $e^+e^-$  Annihilationen von geladenen Spuren übernommen wird, verglichen werden. Abbildung 54 zeigt normalisierte Verteilungen von  $x_p$  als Funktion der Skala des ausgetauschten Bosons. Die ZEUS Messungen verwenden die volle HERA Datenstatistik und sind damit erheblich präziser als die ebenfalls dargestellten H1 Resultate. Ferner sind Resultate aus  $e^+e^-$  Annihilationen gezeigt. Die Messungen zeigen erhebliche Skalenverletzungen mit  $Q$ , d. h. bei großen  $Q$  nimmt der Anteil von Spuren mit kleinem  $x_p$  deutlich zu, während er für große  $x_p$  sinkt. Dies erinnert an die Skalenverletzungen in den inklusiven  $ep$  Wirkungsquerschnitten (siehe Abbildung 42). Obwohl im Detail durchaus Unterschiede zu sehen sind, bestätigen die Daten im Großen und Ganzen die Universalität der Quarkfragmentation in  $ep$ - und  $e^+e^-$ -Reaktionen.

## Ausblick

2007 war das letzte Datennahmejahr des ZEUS Experimentes. In 2008 sind die ersten Ergebnisse für die direkte Messung der Strukturfunktion  $F_L$  zu erwarten für die man HERA in den letzten drei Monaten seiner Betriebszeit erfolgreich mit niedrigeren Protonenergien betrieben hat. Insgesamt wird die abschließende Datenanalyse der HERA II Daten je nach untersuchtem Physikkanal noch einige Jahre dauern. Außerdem gibt es noch viele Möglichkeiten *ganz neue Messungen* mit den Daten zu machen, z. B. im Bereich der Produktion schwerer Quarks. Dabei geht es insbesondere darum, das Potenzial des für HERA II deutlich aufgewerteten Spurkammersystems voll auszuschöpfen. Für einige Detektorkomponenten ist die endgültige Detektorkalibration höchster Güte noch abzuschließen. Die verbesserten Kalibrationen werden erlauben, die bestmöglichen Physikresultate zu erzielen, über die in den zukünftigen Jahresberichten zu lesen sein wird.