

Abbildung 4: Die von H1 aufgezeichnete Luminosität als Funktion der Anzahl der Messtage, getrennt für die HERA I Periode (1994–2000), sowie für den Anfang der HERA II Periode (2003–2004). Die bis jetzt erreichte mittlere longitudinale Polarisierung des Positronstrahles in der HERA II Periode beträgt 32% und –40% für rechts- bzw. linkshändige Polarisierung.

H1 Experiment

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

Sprecher: M. Klein, DESY

Ende 2003 wurde mit der Realisierung des HERA II Programmes begonnen, nachdem in den vorangegangenen Jahren zunächst schwierige Strahluntergrundprobleme zu bewältigen waren. Bis zum August 2004 lief HERA mit Positronen und Protonen, wobei das H1-Experiment etwas mehr Luminosität registrieren konnte als im bisher erfolgreichsten Jahr 2000. Im Herbst 2004 wurde der Beschleuniger auf den Betrieb mit Elektronen umgestellt.

Im Unterschied zur ersten Phase von HERA werden jetzt Kollisionen von polarisierten Leptonen mit Protonen aufgezeichnet. Durch den Sokolov-Ternov-Effekt werden im Speicherring die Positronen oder Elektronen transversal polarisiert. Durch Rotation der Spinorientierung an den ep-Wechselwirkungspunkten wird der Spin longitudinal ausgerichtet und ermöglicht damit Tests der schwachen Wechselwirkung. Erstmals konnte somit die Polarisationsabhängigkeit des Streuquerschnitts der geladenen Stromwechselwirkung gemessen werden. Die entsprechenden Daten wurden auf der ICHEP, der internationalen Konferenz für Hochenergiephysik, im August 2004 in Beijing vorgestellt.

Unter Verwendung aller in den letzten 10 Jahren aufgezeichneten Daten des H1-Experiments wurden,

ebenfalls zur ICHEP-Konferenz, die Analysen von Ereignissen mit isoliert auftretenden Leptonen und großem fehlenden Transversalimpuls präsentiert, deren Häufigkeit die Erwartung des Standardmodells übertrifft. Mit einer bis August integrierten Luminosität von 171 pb^{-1} wurden 10 Ereignisse nachgewiesen, bei denen das isolierte Lepton ein Elektron oder Positron ist, wohingegen nur 2.7 Ereignisse erwartet werden. Im Myonkanal stehen 6 gemessene Ereignissen mit isoliertem Myon einer Erwartung des Standardmodells von 2.6 gegenüber. Bei der Suche nach Ereignissen mit isolierten Taus wurde kein Kandidat gefunden. Beide Analysen, die der „Charged Current Events“ sowie die der „Isolated Leptons“, konnten nahezu Online durchgeführt werden, unter Benutzung neuentwickelter H1 Software im „Object Oriented“ Standard, sowie der parallel zur Datennahme erfolgenden Kalibrationen des Detektors.

Der H1-Detektor konnte im Jahre 2004 zuverlässig betrieben werden. Wesentliche Elemente des Experiments wurden weiterentwickelt, so die auf den Signalen der Drift- und Proportionalkammern basierenden Spurtrigger, der „Jet“-Kalorimetertrigger, das zentrale System der Datenaufnahme, die Rechnerleistung und Analysesoftware, die Protonspektrometer im Vorwärtsbereich und andere.

Die Kollaboration reichte 45 wissenschaftliche Arbeiten bei der ICHEP Konferenz ein, von denen 13 in diesem Jahr publiziert wurden. Wie im Folgenden ausgeführt, setzt die H1-Kollaboration damit die Suche nach neuer Physik bei höchsten Energien, sowie die Analyse der Protonstruktur und der starken Wechselwirkung fort. Herausragende Resultate waren die erste Messung der Dichte der Beauty-Quarks im Proton, die vollständige Analyse der Erzeugung von Lepton- und Jetsignaturen bei hohen Transversalimpulsen im Vergleich mit dem Standardmodell und der Nachweis eines möglicherweise aus 5 Quarks bestehenden gebundenen D^*p Zustands. Wie in Beijing hervorgehoben wurde, sind die HERA-Analysen von entscheidender Bedeutung für die Weiterentwicklung der QCD, so auf dem Gebiet der Partonkorrelationen, verallgemeinerter und unintegrierter Partondichten oder der Diffraktion.

Physiker der H1-Kollaboration nahmen mit wissenschaftlichen und organisatorischen Arbeiten an der Durchführung des HERA-LHC Physik Workshops teil. In mehreren Treffen von Mitgliedern von HERA- und LHC-Experimenten mit theoretischen Physikern wurde in fünf großen Arbeitsgruppen die Bedeutung der HERA-Resultate für die Physik am LHC herausgearbeitet. Die Ergebnisse des Workshops werden im Jahr 2005 vorliegen.

Die H1-Kollaboration nahm mit Physikern aus dem Institut für Kernforschung und Kernenergie der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften, Sofia, sowie der Universität Podgorica (Montenegro) zwei weitere Gruppen als Mitglieder auf. Sie besteht damit jetzt aus 41 Instituten aus insgesamt 15 Ländern.

Der H1-Detektor

Datennahme

Der Datennahme-Betrieb wurde zum Jahreswechsel ohne jegliche Unterbrechung fortgesetzt. Die Vakuumbedingungen im Bereich der H1-Wechselwirkungszone verbesserten sich im Laufe des Jahres stetig, so dass die parallel erfolgende kontinuierliche Erhöhung der HERA-Strahlströme nicht mehr zu unakzeptabel hohem Untergrund im H1-Detektor führte. Ab Mitte Fe-

bruar 2004 stellten die Untergrundverhältnisse im H1-Detektor keine Beschränkung mehr für die Strahlintensität dar und Anfang Juni erreichte die Datennahmeeffizienz für Betrieb mit eingeschalteter Hochspannung sogar wieder Werte von mehr als 85%, die zuvor nur im Jahr 2000 erreicht worden waren. Ab Mitte Juni verschlechterten Probleme mit dem HERA-Vakuumsystem auf der rechten Seite von H1 die Datennahmebedingungen allerdings wieder erheblich. Zunächst trat erneut ein Vakuumleck an einer der kritischsten Stellen von H1 auf, 11 m vor dem Wechselwirkungspunkt. An dieser Stelle treffen drei verschiedene Strahlrohre an einem Absorber für die Synchrotronstrahlung auf engstem Raum zusammen. Die Flanschdichtung des Protonstrahlrohres hatte den hohen thermischen und mechanischen Belastungen nicht standgehalten und musste ausgetauscht werden. Durch die damit verbundene Belüftung des Strahlrohres verschlechterten sich die Vakuumbedingungen wieder. Ein zusätzliches Problem trat kurze Zeit später durch die infolge von Überhitzung entstandene lokale Verformung des Elektronstrahlrohres um einige mm in einem Abstand von 6 m vor H1 auf. Um Gasausbrüche im Vakuum und damit verbundene Strahlverluste zu vermeiden, wurde der verfügbare Parameterraum für den HERA Betrieb stark eingeschränkt.

Trotz dieser Schwierigkeiten war die Datennahme im Positron-Proton Betrieb sehr erfolgreich. H1 konnte insgesamt die Rekordluminosität von 84 pb^{-1} aufzeichnen, von der 57 pb^{-1} mit voll eingeschalteter Hochspannung genommen wurden. Während des Betriebs wurde zweimal die Richtung der longitudinalen Positron-Polarisation gewechselt, so dass je etwa gleichviel Daten mit beiden Polarisationszuständen, mit einer mittleren Polarisation von +32% bzw. -40%, vorhanden sind. Eine vorläufige Analyse dieser Daten ermöglichte die erste Messung der Polarisationsabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts der geladenen schwachen Wechselwirkung.

In der von Mitte August bis Mitte Oktober dauernden Betriebsunterbrechung von HERA konnten defekte Komponenten des Vakuumsystems ausgetauscht und verbesserte technische Lösungen realisiert werden. So verhindert ein Einsatz im oben erwähnten neu eingebauten Absorber, dass das dahinter liegende Strahlrohr von direkter Synchrotronstrahlung getroffen wird. Schweißverbindungen anstelle von geschraubten

Flanschverbindungen sorgen nun ebenfalls für eine erhöhte Betriebssicherheit. Eine verbesserte Instrumentierung mit Temperatursensoren soll zukünftig eine Überhitzung des ausgetauschten Elektronstrahlrohres verhindern.

Die anschließende Umstellung von HERA auf Elektron-Proton-Betrieb machte eine Verschiebung mehrerer HERA-Magnete und des H1-Detektors erforderlich. Obwohl die Strahlströme mit Rücksicht auf die nach den Umbauten des Vakuumsystems anfänglich schlechten Vakuumbedingungen zunächst reduziert waren, gelang es rasch, den Luminositätsbetrieb wiederaufzunehmen, wobei Rekordwerte für die spezifische Luminosität erreicht wurden.

Reparaturen und Erweiterungen

Durch ein im Mai aufgetretenes Leck an einer schadhafte Verbindung im Wasserkühlkreis für den Vorwärts-Siliziumdetektor (FST) wurde ein großer Teil der FST-Sensoren und der Ausleseelektronik so stark beschädigt, dass dieser Detektor nicht mehr betrieben werden konnte. Die genaue Inspektion nach dem Ausbau der Siliziumdetektoren ergab, dass für eine erfolgreiche Reparatur eine Neubeschaffung aller Sensoren und ein Neubau der Frontendelektronik notwendig waren. Da die noch zu erwartende integrierte Strahlenbelastung in der verbleibenden Laufzeit von HERA nahe an die tolerierbare Grenze des bisher verwendeten Auslesechips reicht, wurde beschlossen, den Chip in strahlenresistente Technologie zu übertragen und neu zu bauen. Darüberhinaus zeigte sich, dass eine Überarbeitung des gesamten Kühlkreislaufs auch im Falle des gleichzeitig ausgebauten Rückwärts-Siliziumdetektors (BST) notwendig war. Da diese sehr aufwändigen Reparaturarbeiten nicht vor Beendigung der HERA Betriebsunterbrechung fertiggestellt werden konnten, werden FST und BST erst im Sommer 2005 wieder eingebaut. Die Funktion des BST als Strahlungsmonitor wird mit einem neuen segmentierten Szintillator erfüllt, der anstelle des BST hinter dem zentralen Siliziumdetektor (CST) installiert wurde. Die Zugangsmöglichkeit zum H1-Detektor im Sommer 2004 wurde auch genutzt, um Reparaturen am CST vorzunehmen, der zuvor wegen eines Kurzschlusses an der Frontendelektronik nur zu 75% aktiv war. Ebenso konnten eine Anzahl fehlerhafter Frontendkarten der inneren Proportionalkam-

mer (CIP) ersetzt werden, so dass der für die effiziente Datennahme wichtige CIP-Trigger wieder mit erhöhter Redundanz betrieben werden kann. Ein wichtiger Schritt war auch die erfolgreiche Inbetriebnahme der ersten von insgesamt drei Triggerstufen des neuen „Fast Track Triggers“ (FTT), der es zukünftig erlauben wird, exklusive Endzustände mit geladenen Teilchen Online zu selektieren. Das im Zuge der Installation des neuen Vorwärtsspektrometers (VFPS, bei 220 m in Protonstrahlrichtung) entwickelte hochpräzise System für die kontrollierte Führung der Faserdetektoren an den Protonstrahl, wurde auch in die Stationen des existierenden FPS-System eingebaut und erlaubt einen zuverlässigeren Betrieb dieser Detektoren, die für die diffraktive Physik von großer Bedeutung sind. Mit großem Erfolg konnte nach der HERA-Betriebspause der existierende optische Faser-Ring für die zentrale Datenakquisition, durch ein auf VME PCs und Fast Ethernet basierendes System ersetzt werden. Damit wurden Zuverlässigkeit und Wartungsmöglichkeit dieser wesentlichen Komponente deutlich verbessert.

Physikalische Ergebnisse

Die Auswertung der zahlreichen Messdaten von HERA I wurde fortgesetzt, was zu einer gegenüber 2003 deutlich erhöhten Anzahl von Publikationen führte. Im Folgenden werden wichtige, im Berichtsjahr abgeschlossene Analysen etwas näher erläutert.

QCD und Protonstruktur

Die Erforschung der Protonstruktur und die kritische Überprüfung der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, ist eine der Hauptaufgaben der HERA-Physik.

In zwei Veröffentlichungen wurden exklusive Endzustände ausgewählt, in welchen ein energetisches Photon bzw. ein energetisches neutrales π -Meson (π^0) nachgewiesen wurde, um die Gültigkeit der QCD in speziellen Bereichen des Phasenraums zu prüfen. Außerdem wurde in einer Veröffentlichung die Strukturfunktion des Protons bei sehr niedrigen Viererimpulsüberträgen (Q^2) mit Hilfe sogenannter QED Compton-Ereignisse bestimmt.

Bei der tiefunelastischen Elektron-Proton-Streuung wird ein Eichboson (dominant ein virtuelles Photon) zwischen dem Elektron und dem Proton ausgetauscht, wobei der Viererimpulsübertrag Q^2 ein Maß für die Auflösung ist, mit welcher die Protonstruktur untersucht wird. Das ausgetauschte Eichboson streut an einem Quark oder Gluon (so genannte Partonen) im Proton. Die Protonstruktur wird dann durch Strukturfunktionen beschrieben, die von der Variablen x abhängen, dem Anteil des Protonimpulses, der von dem wechselwirkenden Parton getragen wird. Im größten Teil des Phasenraums bei HERA ist der Streuquerschnitt proportional zu der Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$. Die HERA-Experimente H1 und ZEUS haben in mehreren früheren Veröffentlichungen gezeigt, dass die gemessene Funktion F_2 über einen großen Bereich der Variablen x und Q^2 sehr gut von der QCD beschrieben werden kann. Bei kleinen Werten von $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ kann jedoch die QCD in Störungsrechnung nicht angewendet werden; hier werden stattdessen phänomenologische Modelle zur Beschreibung angesetzt, insbesondere solche, die auf der Regge-Theorie basieren. Besonderes Interesse gilt daher dem Übergangsbereich von perturbativer QCD zur niederenergetischen Phänomenologie.

Messungen bei kleinen Impulsüberträgen erfordern spezielle Experimentiertechniken, weil das gestreute Elektron häufig den Detektor unter sehr kleinen Streuwinkeln verlässt, ohne nachgewiesen zu werden. In der erwähnten Veröffentlichung wurde ausgenutzt, dass in einem kleinen Teil dieser Streuprozesse das Elektron schon vor der Kollision mit dem Parton ein so genanntes QED-Compton-Photon abstrahlt. Auf diese Weise erhält das Elektron einen Transversalimpuls und kann daher selbst bei kleinen Werten von Q^2 in das rückwärtige Kalorimeter gestreut werden. Durch Nachweis sowohl des Photons als auch des Elektrons wird die Ereigniskinematik der QEDC-Prozesse rekonstruiert.

Der x -Bereich wurde zu großen Werten hin erweitert, als Folge der QEDC-Kinematik sowie auch durch eine verbesserte Rekonstruktion des hadronischen Endzustandes, der aus dem gestreuten Parton hervorgeht. Hierdurch wurde eine x -Region erreicht, in der sonst nur Daten aus älteren, so genannten „Fixed Target“ Experimenten vorliegen, was einen direkten Vergleich mit diesen ermöglicht. Abbildung 5 zeigt die Strukturfunktion F_2 , aufgetragen gegen x , für drei Werte von Q^2 .

Die neuen Messungen von H1 stimmen gut mit den früheren Experimenten (E665, NMC, SLAC) überein.

Um die Emission von hochenergetischen Photonen geht es auch in einer anderen Veröffentlichung, wobei die Photonen hier vom hadronischen System abgestrahlt werden. In diesen Ereignissen, die einen sehr kleinen Teil der totalen Wechselwirkungsrate ausmachen, werden die Photonen „prompt“ genannt. Sowohl das Photon als auch das hadronische System werden im Flüssig-Argon Kalorimeter nachgewiesen. Dabei ist wichtig, dass die Photonen, dank der hohen Granularität des Kalorimeters, aufgrund ihres besonders engen Schauerprofils vom Untergrund statistisch gut getrennt werden können. So konnten Wirkungsquerschnitte als Funktion von sowohl der transversalen Energie als auch der Pseudorapidität des Photons gemessen werden, wobei die Pseudorapidität ein Maß für den Streuwinkel bezüglich der Strahlrichtung ist. In Abbildung 6 werden die gemessenen Wirkungsquerschnitte mit mehreren Störungsrechnungen der QCD verglichen, sowohl in führender (LO) als auch in nächst-führender Ordnung (NLO) der starken Kopplungskonstanten α_s . Man sieht, dass die Vorhersagen dieser Rechnungen mindestens 30% unter den Daten liegen. Die Diskrepanz zwischen Daten und Theorie wurde auch untersucht, wenn zusätzlich zum prompten Photon ein hadronischer „Jet“ verlangt wird. Ein „Jet“ entspricht einem energetischen Parton, das im Kollisionsprozess in ein enges Bündel von Hadronen fragmentiert. Wirkungsquerschnitte, gewonnen für Ereignisse mit promptem Photon und einem hadronischen Jet, sind ebenfalls in Abbildung 6 gezeigt und mit den Rechnungen der QCD verglichen. Die Übereinstimmung zwischen Daten und Vorhersagen der Rechnungen ist hier besser, obwohl die Daten immer noch etwas über den Vorhersagen liegen. Da in diesem Fall die so genannten hadronischen Korrekturen kleiner sind als im Falle der inklusiven prompten Photonen, kann man vermuten, dass die Diskrepanzen im inklusiven Fall auf den noch nicht berechneten höheren Ordnungen jenseits von NLO beruhen.

In einer weiteren Veröffentlichung wurden Endzustände mit einem energetischen neutralen π -Meson (π^0) untersucht. Da das π^0 in zwei Photonen zerfällt, kann es im Flüssig-Argon Kalorimeter nachgewiesen und aufgrund des breiteren Schauerprofils statistisch gut von den prompten Photonen (siehe oben) getrennt werden. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf den Pha-

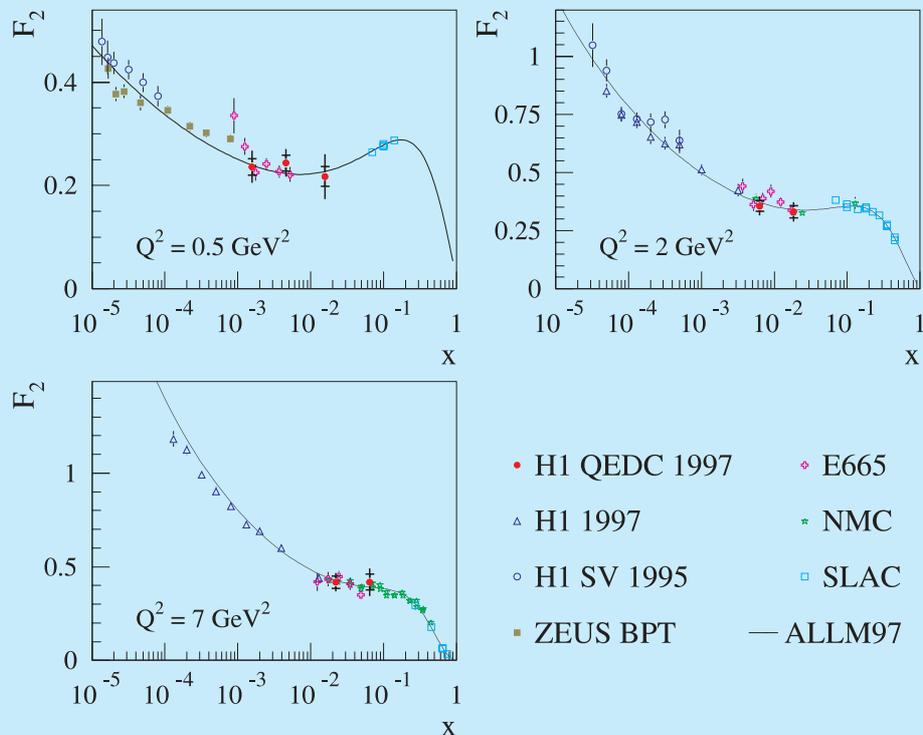
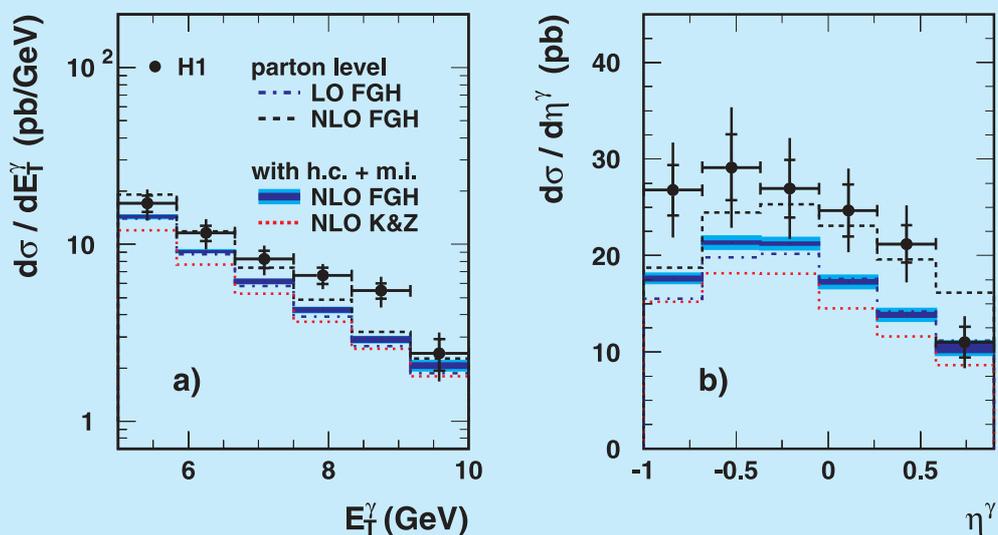


Abbildung 5: Messungen der Proton Strukturfunktion F_2 mit Hilfe von QED Compton-Ereignissen („H1 QEDC“) verglichen mit früheren Messungen bei HERA sowie mit Messungen aus „Fixed Target“ Experimenten. Die durchgezogene Kurve zeigt eine Parameterisierung der Strukturfunktion, die auf einer Verbindung der Regge-Theorie mit perturbativer QCD basiert.

senraumbereich nahe an der Richtung des ausgehenden Protons, die als „Vorwärts“-Richtung bezeichnet wird. Aufgrund des hohen Transversalimpulses des π^0 können hier Störungsrechnungen in der QCD vorgenommen werden. Interessant ist dabei, dass es im Bereich der Vorwärtsrichtung bei kleinen Werten von x noch keine eindeutige theoretische Beschreibung gibt, und dieser daher als Testbereich für verschiedene Ansätze der Rechnungen dienen kann. In einer früheren Studie (siehe Jahresbericht 1999) konnte schon gezeigt werden, dass die so genannte DGLAP-Approximation der Parton-Kaskade, die sonst in einem sehr großen Bereich von Q^2 und x die Daten gut beschreibt, hier deut-

lich unter den Daten liegt. Allerdings gab es damals nur Rechnungen in führender Ordnung. In der vorliegenden Studie konnte die Daten-Statistik verdreifacht und Wirkungsquerschnitte als Funktion von mehreren Variablen, z. B. des Transversalimpulses und der Pseudorapidität des π^0 , gemessen werden. Auch wurde jetzt zum erstenmal die Energieverteilung des übrigen hadronischen Systems neben dem π^0 bestimmt. Die Vergleiche mit neueren QCD-Rechnungen, nun auch in nächstführender Ordnung, zeigen im Allgemeinen gute Übereinstimmung mit den Daten, ausgenommen für solche Modelle, die das ausgetauschte virtuelle Photon als strukturlos behandeln.

Inclusive prompt photon



Prompt photon + jet

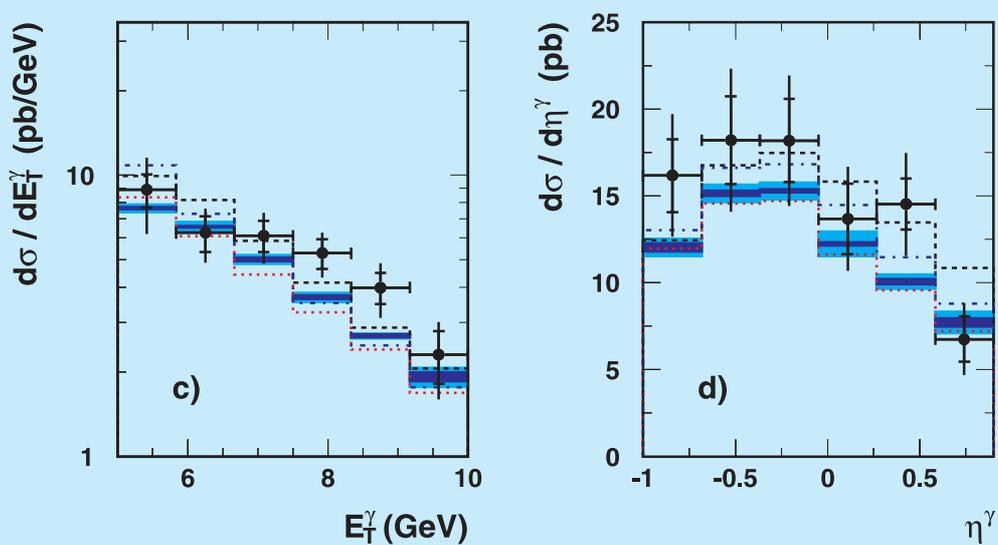


Abbildung 6: Wirkungsquerschnitte der Erzeugung von direkten Photonen in ep -Kollisionen als Funktion der Transversalenergie und der Pseudorapidität des Photons (a,b). In (c,d) sind die entsprechenden Wirkungsquerschnitte aufgetragen, wenn zusätzlich zum direkt erzeugten Photon noch ein hadronischer Jet verlangt wird. QCD-Rechnungen in führender (LO) und nächst-führender (NLO) Ordnung sind mit den Daten verglichen.

Produktion von 2-Jet Ereignissen mit assoziiertem, führendem Neutron

Etwa 10% der Ereignisse in der tief-unelastischen ep-Streuung sind diffraktiver Natur. Bei solchen Ereignissen verliert das Proton nur wenig an Energie und bleibt entweder „intakt“ oder „dissoziiert“ in ein System mit einer Masse von einigen GeV. Bleiben zudem die Quantenzahlen unverändert, spricht man von „Pomeron“-Austausch. Diese Klasse von Ereignissen wurde bereits in vielen Studien bei HERA untersucht.

In einem Teil der Ereignisse gibt das Proton aber seine elektrische Ladung ab und verwandelt sich in ein Neutron, das in einem speziellen Kalorimeter nachgewiesen wird, welches sich in Protonrichtung, etwa 100 m vom Hauptdetektor entfernt, befindet. Das vom Proton ausgetauschte System trägt nun positive elektrische Ladung und man spricht von „Reggeon“-Austausch. Der wahrscheinlichste Kandidat hierfür ist ein geladenes Pion, und Modelle, die auf Pion-Austausch (OPE, One Pion Exchange) basieren, konnten in früheren Studien erfolgreich zur Beschreibung dieser Reaktionen eingesetzt werden.

In einer Veröffentlichung wurden im Berichtsjahr solche Neutron-Ereignisse eingehender studiert, wobei verlangt wurde, dass das hadronische System im Hauptdetektor zwei energetische Jets aufweist, so genannte Dijet-Ereignisse. Die Energie der Jets dient als Skala für den harten Streuprozess in den QCD-Rechnungen. Ereignisse, sowohl aus Photoproduktion als auch aus tief-unelastischer Streuung, wurden selektiert und Wirkungsquerschnitte als Funktion von Q^2 , von Transversalenergie und Pseudorapidität der Jets, als auch von anderen kinematischen Variablen gemessen.

Vergleiche von verschiedenen QCD-Rechnungen mit den Daten bestätigen die früheren Resultate, nämlich dass auf Pion-Austausch basierende Modelle die Daten gut beschreiben. Dagegen liefern Modelle, die diesen Pion-Austausch nicht beinhalten, im Allgemeinen eine schlechtere Beschreibung. Zum erstenmal konnten auch QCD-Rechnungen in nächst-führender Ordnung (NLO) zum Vergleich herangezogen werden. Abbildung 7 zeigt, dass diese Rechnungen die Daten recht gut beschreiben.

Des Weiteren wurden die Dijet-Daten mit führendem Neutron mit inklusiven Dijet-Daten verglichen. Da-

bei sollte das Verhältnis zwischen den jeweiligen Wirkungsquerschnitten unabhängig von den kinematischen Variablen bleiben, wenn der grundlegende Mechanismus für die Jetproduktion in beiden Fällen der gleiche ist. Die Daten unterstützen im Allgemeinen diese Hypothese, mit einigen Ausnahmen. So steigt z. B. das Verhältnis mit zunehmendem Impulsanteil, mit dem das ausgetauschte virtuelle Photon an der Kollision teilnimmt, an. Dies kann so interpretiert werden, dass bei Neutron-assoziiertem Dijet-Produktion der Beitrag von Photonen, die vor der harten Streuung nicht in ein hadronisches System fluktuieren, sondern direkt an der Wechselwirkung teilnehmen, eine größere Rolle spielt als im inklusiven Fall.

Physik schwerer Quarks

Erzeugung und Zerfall schwerer Quarks (Charm c und Beauty b) in unelastischer ep-Streuung bei HERA-Energien sind von herausragendem Interesse zur Erforschung der Protonstruktur sowie der Quantenchromodynamik. Der dominante Mechanismus der Erzeugung schwerer Quarks führt über die Fusion des virtuellen Photons mit einem Gluon aus dem Proton zur Bildung eines Paares schwerer Quarks, d. h. $\gamma^*g \rightarrow c\bar{c}$ oder $b\bar{b}$. Die schweren Quarks bilden häufig mit leichteren Quarks Charm- oder Beauty-Hadronen, d. h. Mesonen oder Baryonen, die eine endliche Lebensdauer haben, welche einer Zerfallslänge von 100–500 μm entspricht und folglich im zentralen Siliziumdetektor (CST) von H1 nachweisbar ist. In Abhängigkeit von der Größe des durch das Photon übertragenen Viererimpulses, Q^2 , kann man die schweren Quarks als dem Proton zugehörig oder, bei kleinen Q^2 , als außerhalb des Protons erzeugt betrachten. Die erhöhte Luminosität sowie die Siliziumdetektortechnik erlauben es, die Untersuchung schwerer Quarks mit dem H1-Experiment wesentlich weiterzuentwickeln. Dieser Thematik dienten, mit unterschiedlichem Fokus, drei Publikationen, die zu den herausragenden Arbeiten der Charm- und Beauty-Physik bei HERA zählen.

Die klassische Methode zum Nachweis von Charm-Teilchen bei HERA besteht in der Rekonstruktion des D^* -Mesons, das über den Zwischenzustand eines neutralen D^0 -Mesons in die Endzustandsteilchen $K\pi\pi$ zerfällt. Da die Massen von D^* und D^0 nahezu gleich sind,

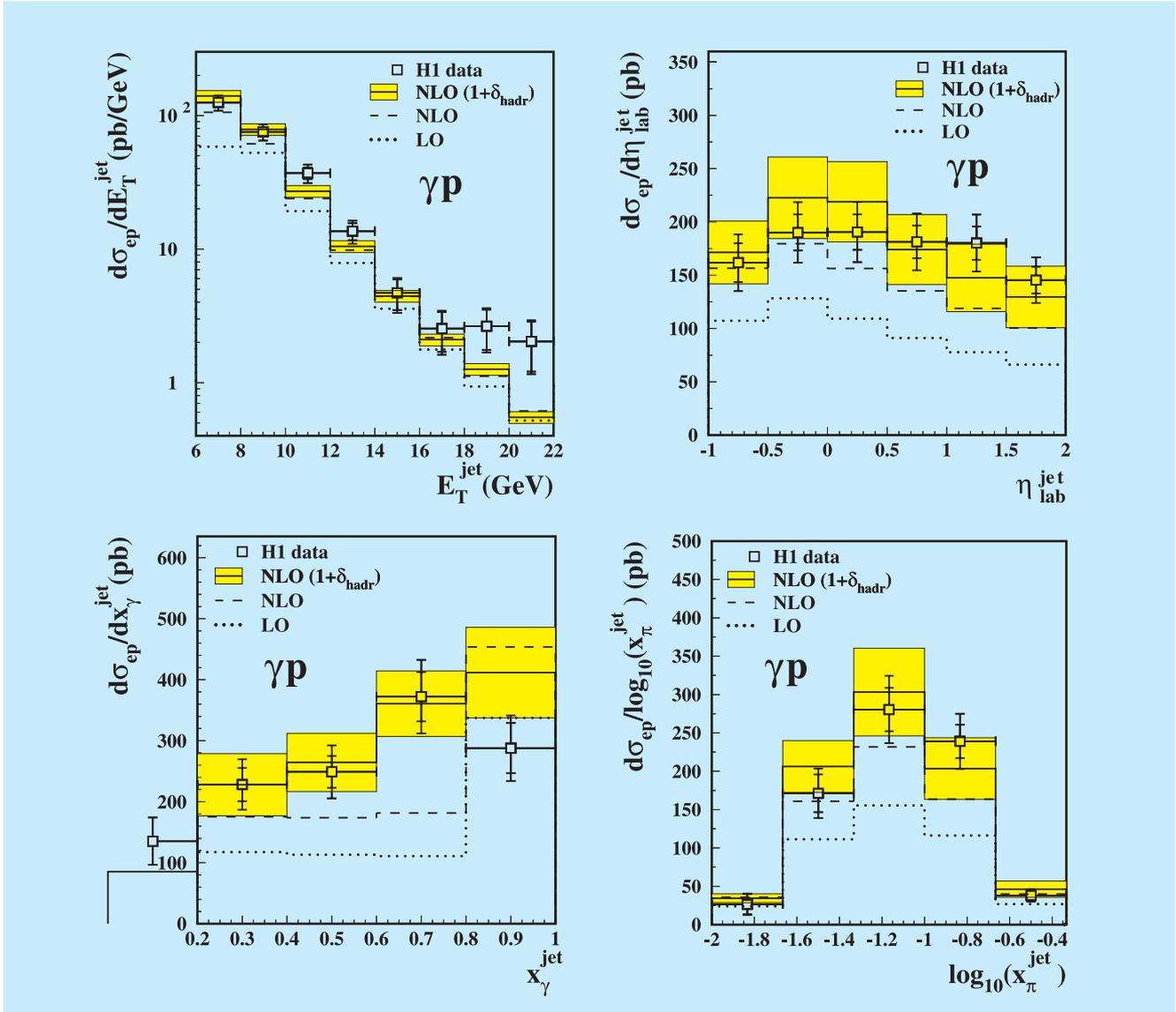


Abbildung 7: Wirkungsquerschnitte für die Photoproduktion von Dijet-Ereignissen mit assoziiertem, führendem Neutron als Funktion von mehreren kinematischen Variablen. Die Daten sind mit QCD-Rechnungen in führender (LO) und nächst-führender (NLO) Ordnung verglichen, wobei Unsicherheiten der Rechnungen als Bänder dargestellt sind.

ist eines der Pionen sehr langsam. In der experimentellen Verteilung der Massendifferenz $M(K\pi\pi) - M(K\pi)$ ist das D^* -Meson folglich als klar erkennbare Resonanz gut nachweisbar.

In einer der Publikationen wurde in Ereignissen mit auf diese Weise identifizierten D^* -Mesonen nach zu-

sätzlichen Protonen bzw. Anti-Protonen gesucht und die invariante Masse des D^*p -Paares gebildet. Wie in Abbildung 8 gezeigt, wurde in den Daten ein gebundener Zustand des D^* mit einem (Anti-)Proton bei einer Masse von etwa 3100 MeV nachgewiesen. Das Interesse an diesem erstmalig beobachteten Zustand ergibt sich aus seiner Masse, der engen Breite sowie der exo-

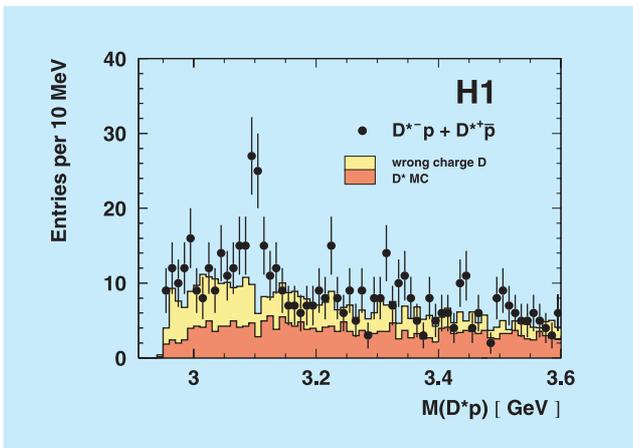


Abbildung 8: Verteilung der invarianten Masse $M(D^*p)$ für entgegengesetzte Ladungen des D^* -Mesons und des (Anti)protons, für in tief-unelastischer Streuung registrierte Ereignisse. Der Untergrund wird durch die Summe von Charm- (rot) und nicht-Charm-Anteilen (gelb) beschrieben. Bei 3.1 GeV ist eine resonante Struktur zu erkennen, die als Charm-Pentaquark interpretiert werden kann.

tischen Kombination von Teilchen: Im Quark-Modell kann man die D^*p -Resonanz als 5-Quark-Zustand, so genanntes Pentaquark, bestehend aus zwei leichten Up-Quarks (u), zwei leichten Down-Quarks (d) sowie einem schweren Anti-Charm-Quark (\bar{c}), beschreiben. Im Quark-Modell bestehen Mesonen aus gebundenen Zuständen von Quarks und Antiquarks, wie z. B. das Pion π^+ ($u\bar{d}$), und Baryonen aus 3 Quarks, wie z. B. das Proton p (uud).

Seit Jahren suchte man nach exotischen, gebundenen Zuständen von mehr als 3 Quarks. Zunächst ohne Erfolg, bis im Jahr 2003 von mehreren Experimenten gebundene 5-Quark-Zustände bei einer Masse von etwa 1530 MeV nachgewiesen wurden, die in ein Neutron und ein K^0 zerfallen und daher einen $udd\bar{s}$ Zustand bilden, wobei \bar{s} das Anti-Strange-Quark ist. Das Interesse an solchen Mehrquarkzuständen wurde erheblich durch das „Chiral Quark Soliton Model“ gefördert, in dem 5 Quarks metastabile, gebundene Zustände bilden können, was zu ganzen Multipletts von Strange- oder Charm-Pentaquarks führt, deren Mitglieder eine enge Breite und vorhersagbare Masse besitzen. Die experimentelle Evidenz beider Arten von Pentaquarks ist bisher allerdings noch kontrovers. Der bei H1 be-

obachtete Zustand wurde in verschiedenen Datenperioden, unabhängigen Analysen und sowohl in Photoproduktion als auch in der tief-unelastischen Streuung konsistent beobachtet und nach eingehender Prüfung publiziert.

In einer weiteren Publikation wurde die Erzeugung von D-Mesonen, D^+ , D^0 , D_s und D^* , eingehend untersucht, vgl. Abbildung 9. Die Häufigkeit für die Produktion der D-Mesonen in ep-Streuung berechnet sich aus der Faltung der Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung eines Charm-Quarks mit der Fragmentationsfunktion, die die Entstehung eines D-Mesons aus einem virtuellen c-Quark beschreibt. Während die Charm-Quark-Produktion störungstheoretisch berechenbar ist, kann man die Fragmentationsfunktion nur phänomenologisch darstellen. Die Messung einer Vielzahl von D-Mesonen mit verschiedenem Quarkinhalt, sowie der Vergleich mit Daten aus e^+e^- Experimenten und mit Photoproduktionsdaten von ZEUS erlaubt es daher, zu untersuchen, inwieweit deren Erzeugung vom Quarkinhalt und von der Art der Reaktion abhängt. Es zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeit der Heranziehung anderer, leichter Quarks zur Bildung von D-Mesonen im Rahmen der erzielten Genauigkeit unabhängig vom Reaktionstyp ist. Das bedeutet, dass die Fragmentationsfunktion universell ist, unabhängig vom harten Streuprozess und auch von der Skala, bei der Charm-Teilchen erzeugt werden.

Ebenso wie die D-Meson-Analyse machte die dritte Publikation zu schweren Quarks Gebrauch von der charakteristischen Lebensdauer der Charm- und Beauty-Teilchen. In einer erstmalig durchgeführten, inklusiven Analyse der Zerfallslängen konnte der CST-Detektor dazu benutzt werden, Ereignisse mit Charm- und Beauty-Teilchen anzureichern und ihre relativen Anteile zu bestimmen, ohne explizite Rekonstruktion einzelner D- oder B-Mesonen. Diese Methode erlaubte, die Anteile der schweren Quarks an der Protonstruktur zu messen, siehe Abbildung 10. Die Resultate bestätigten die Erwartungen in hervorragender Weise: für die Charm-Strukturfunktion F_2^c stimmten sie gut mit den bisher aus D^* -Rekonstruktionen, sowohl von H1 als auch von ZEUS extrapolierten Werten, überein. Die Strukturfunktion der Beauty-Quarks, F_2^b , wurde erstmalig gemessen. Im erfassten kinematischen Bereich großer Impulsüberträge Q^2 und nicht zu kleiner Partonimpulsanteile x haben Beauty-Quarks nur etwa

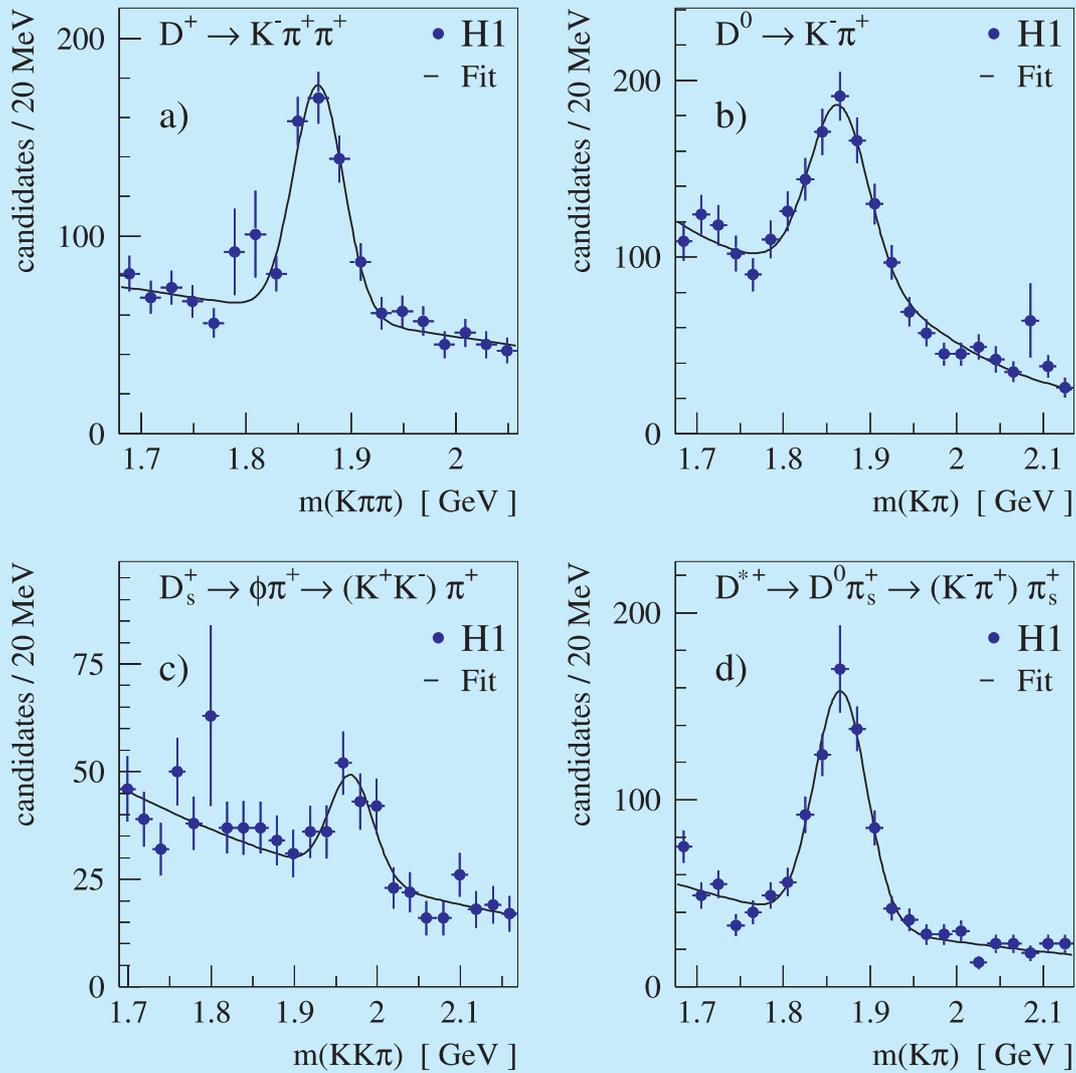


Abbildung 9: Rekonstruktion der vier untersuchten D -Mesonenzustände D^+ , D^0 , D_s^+ und D^{*+} . Die Signifikanz der Signale ist erhöht, da in der Messung der CST-Siliziumdetektor zur Anreicherung der Charm-Signale benutzt wurde.

3% Anteil an der Gesamtdichte. Dieses Ergebnis wird recht genau durch die Analyse der Skalenverletzungen der diese Dichte beschreibenden Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ in der QCD vorhergesagt (Abbildung 10). Die

genaue Messung der Beauty-Quarkdichte im Proton ist eine herausragende Aufgabe, sowohl im Hinblick auf die Ausarbeitung der QCD als auch in Vorbereitung kommender Experimente am LHC bei CERN.

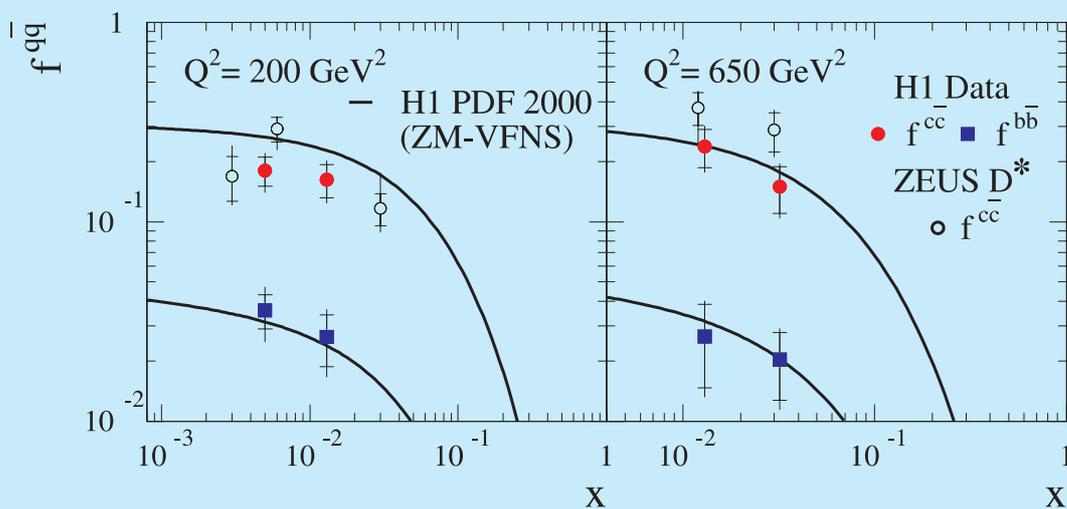


Abbildung 10: Relativer Beitrag der Charm- und Beauty-Erzeugung zum Gesamtwirkungsquerschnitt als Funktion von x bei verschiedenen, hohen Werten von Q^2 . Die Charm-ZEUS-Daten wurden aus D^* -Analysen erhalten. Der Beauty-Anteil wurde erstmalig bestimmt. Die Kurven sind absolute Vorhersagen einer NLO QCD-Analyse der Skalenverletzungen der Strukturfunktion F_2 .

Anti-Deuteron Produktion und Suche nach schweren geladenen Teilchen

Eine weitere Veröffentlichung beschäftigte sich mit der direkten Suche nach langlebigen, schweren geladenen Teilchen, die bei der Kollision von Photonen und Protonen erzeugt werden. Die Analyse ist unabhängig davon, ob es sich um bekannte oder um neuartige Teilchen außerhalb des Standardmodells handelt. Charakteristisch für solche Objekte ist ihr hoher spezifischer Energieverlust, der mit guter Genauigkeit in der zentralen Spurkammer gemessen wird. Im Fall von negativ geladenen Teilchen wurde kein Kandidat schwerer als ein Anti-Deuteron – dem Kern von Anti-Deuterium – und für positive Ladungen kein Teilchen schwerer als ein Triton – dem Kern von Tritium – gefunden. Hieraus konnte eine obere Grenze von 0.19 nb für den Produktionsquerschnitt ermittelt werden.

Dagegen wurden unter den negativ geladenen Teilchen 45 Anti-Deuteron Kandidaten beobachtet, die

aus einem Anti-Neutron und einem Anti-Proton bestehen. Die Erzeugung von Anti-Deuteronen kann mit Hilfe des so genannten Koaleszenz-Modells verstanden werden. Im Rahmen dieses Modells ist die Wahrscheinlichkeit, ein Anti-Deuteron zu produzieren, proportional zum Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten für die Erzeugung eines Anti-Protons und eines Anti-Neutrons bei der Kollision. Die Proportionalitätskonstante B_2 ist dabei ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass Anti-Proton und Anti-Neutron räumlich dicht beieinander und mit kleiner relativer Geschwindigkeit zueinander erzeugt werden und damit für den inversen Radius des bei der Kollision entstehenden „Feuerballs“. Der Vergleich der H1-Daten mit Resultaten, die in Proton-Proton- (pp), Proton-Nukleus- (pA) bzw. Nukleus-Nukleus- (AA) Kollisionen gewonnen wurden, kann so interpretiert werden, dass die Größe des Wechselwirkungsvolumens zum Zeitpunkt der Formation von Nukleonen bei der Kollision von elementarerer Objekten, wie Photon oder Proton, erheblich kleiner ist als im Falle von Kollisionen schwerer Ionen. Abbildung 11 verdeutlicht, dass dieser Unterschied mit zunehmender Schwerpunktenenergie wächst.

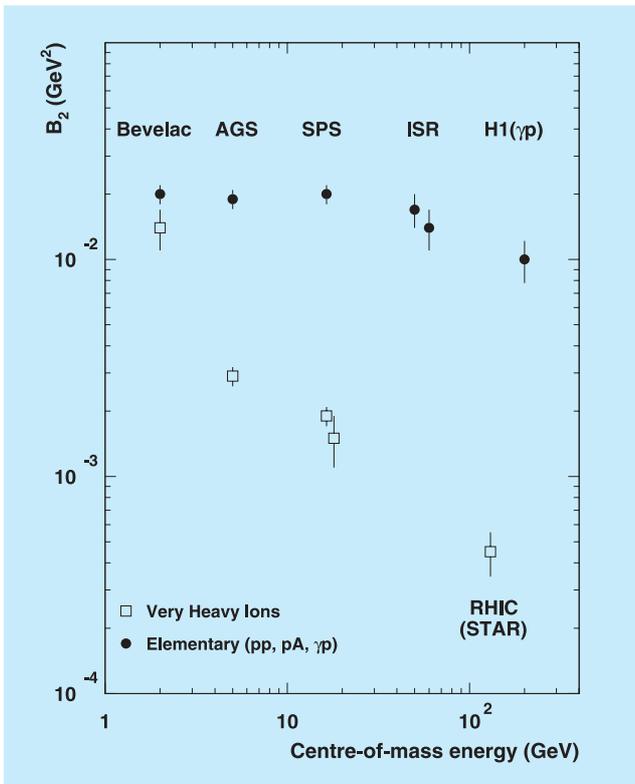


Abbildung 11: Der Parameter B_2 in Abhängigkeit von der Schwerpunktsenergie für Kollisionen von schweren Ionen (offene Quadrate) und elementareren Teilchen (schwarze Punkte). B_2 ist ein Maß für den inversen Radius des bei der Kollision entstehenden Feuerballs. Die Größe des Wechselwirkungsvolumens zum Zeitpunkt der Erzeugung von Nukleonen in der Kollision von elementareren Objekten, wie Photon oder Proton, ist erheblich kleiner als im Falle von Kollisionen schwerer Ionen. Diese Tendenz wächst mit zunehmender Schwerpunktsenergie.

Physik jenseits des Standardmodells

Obwohl es bisher kein etabliertes experimentelles Resultat gibt, das dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik widerspricht, gibt es verschiedene Hinweise darauf, dass dieses Modell erweitert werden muss. Insofern ist die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells bei jedem Vorstoß in einen höheren Energiebereich, wie auch HERA ihn darstellt, von größter Bedeutung.

Im Berichtsjahr wurden fünf Veröffentlichungen publiziert, in denen nach Physik jenseits des Standardmodells gesucht wurde. Eine dieser Veröffentlichungen beinhaltet eine generische, modellunabhängige Suche, drei beziehen sich auf die Suche nach supersymmetrischen Teilchen und in einer weiteren werden magnetische Monopole gesucht.

In bisherigen Suchen nach neuer Physik bei H1 wurden die Messdaten derart analysiert, dass nach Merkmalen eines spezifischen neuen Effektes (z. B. Existenz eines neuen Teilchens) gesucht wurde. Dagegen wurde in der im Folgenden besprochenen Veröffentlichung eine allgemeine Suche nach irgendeiner Abweichung von den Erwartungen des Standardmodells durchgeführt. Diese Suche ist modellunabhängig und somit sensitiv auf neue Physik, von der man möglicherweise heute noch keine konkreten Vorstellungen hat. Da neue Physik mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zuerst im Bereich hoher Teilchenenergien sichtbar wird, konzentrierte sich diese „generische“ Suche auf Streuereignisse, in denen Teilchen (Elektronen, Myonen, Photonen, Jets und Neutrinos) mit Transversalimpulsen größer als 25 GeV nachgewiesen wurden. Dabei wurden alle Ereignisse klassifiziert, die wenigstens zwei dieser hochenergetischen Teilchen aufwiesen, und dann die Massen und totalen transversalen Energien dieser Teilchensysteme bestimmt. Für jeden möglichen Kanal (z. B. $e-j-\gamma$, d. h. Elektron + Jet + Photon) wurde die Anzahl der gemessenen Ereignisse mit der Erwartung aus dem Standardmodell verglichen. Abbildung 12 zeigt, dass für nahezu alle erfassten Kanäle eine gute Übereinstimmung mit der Erwartung gegeben ist. Nur die Ereignisklasse $\mu-j-\nu$, mit Muon, Jet und Neutrino, zeigt eine größere Abweichung. Die Wahrscheinlichkeit, dass solch eine Abweichung als statistische Fluktuation der Erwartung des Standardmodells eintritt, beträgt jedoch einige Prozent, d. h. sie ist nicht so signifikant, dass man die Entdeckung eines neuen Effektes behaupten könnte. Der Überschuss von Ereignissen dieser Topologie wurde auch schon in früheren spezifischen Analysen beobachtet (siehe Jahresberichte 2002 und 2003) und ist eines der hochinteressanten Rätsel in den HERA-Daten. Die erwartete signifikante Erhöhung der Luminosität in der HERA II Periode sollte erlauben, die Frage der Herkunft dieser Ereignisse schlüssig zu beantworten.

Symmetrie ist in der Physik ein sehr erfolgreiches Prinzip zum Verständnis von Zusammenhängen. Im Stan-

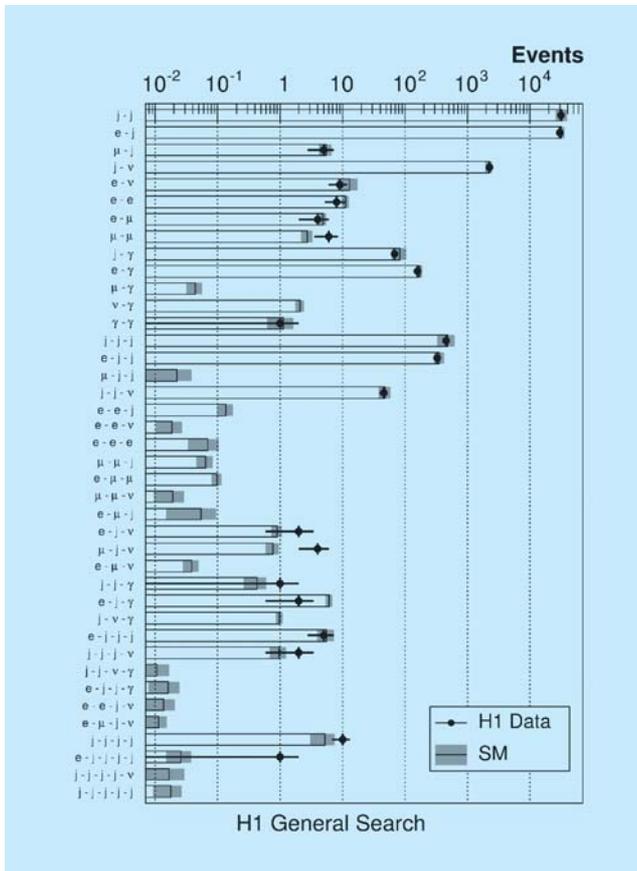


Abbildung 12: Allgemeine Suche nach Physik jenseits des Standardmodells (SM). Ereigniszahlen für Daten (Messpunkte) und die Simulation (Histogramm) für alle untersuchten Reaktionskanäle ($e = \text{Elektron}$; $\mu = \text{Muon}$; $j = \text{Jet}$; $v = \text{Neutrino}$; $\gamma = \text{Photon}$). Die Fehlerbänder an der Erwartung beinhalten die Modellunsicherheiten und die experimentellen systematischen Fehler.

Standardmodell gibt es bezüglich des Spins der Teilchen eine Asymmetrie: die Materieteilchen (Quarks und Leptonen) sind Fermionen mit halbzahligen Spin, wohingegen die für die Wechselwirkungen verantwortlichen Austauschteilchen Bosonen mit ganzzahligen Spin sind. Ein theoretisch sehr vielversprechendes Modell, die Supersymmetrie, stellt eine neue Verbindung zwischen den Materieteilchen und den Eichbosonen her. Die Supersymmetrie postuliert für jedes uns heute bekannte Quark und Lepton einen supersymmetrischen Partner, Squark und Slepton, mit Spin 1/2 und umgekehrt zu jedem Eichboson einen Partner, Gaugino, mit halb-

zahligen Spin. Da diese supersymmetrischen Partner bis heute nicht gefunden wurden, ist die Supersymmetrie sicherlich gebrochen und diese neuen Teilchen haben hohe Massen. Theoretische Überlegungen zeigen jedoch, dass einige supersymmetrische Teilchen unter Umständen im HERA energetisch zugänglichen Bereich produziert werden könnten. Die neuen supersymmetrischen Teilchen werden durch eine neue Quantenzahl (R-Parität) mit $R = -1$ charakterisiert, wogegen alle uns „bekannten“ Teilchen $R = 1$ besitzen. Die im Folgenden besprochenen Veröffentlichungen zur Suche nach supersymmetrischen Teilchen konzentrieren sich auf Prozesse, in denen supersymmetrische Teilchen einzeln produziert werden, und in denen somit die R-Parität nicht erhalten ist.

In einer Veröffentlichung wurde nach Squarks gesucht, die in der Elektron-Quark-Fusion produziert werden ($\text{Elektron} + \text{Quark} \rightarrow \text{Squark}$). Es wurde eine große Anzahl möglicher Zerfallskanäle des Squarks untersucht, sowohl solche, in denen die R-Parität auch im Zerfall verletzt ist, als auch solche, in denen am Ende der Zerfallskaskade das leichteste supersymmetrische Teilchen auftritt, das dann den Detektor ungesehen verlässt und dadurch zu einer messbaren Verletzung der transversalen Energiebilanz führt. In allen untersuchten Kanälen wurden Ereignisraten gesehen, die gut mit den Erwartungen des Standardmodells ohne supersymmetrische Erweiterung übereinstimmen. In Abbildung 13 ist dies

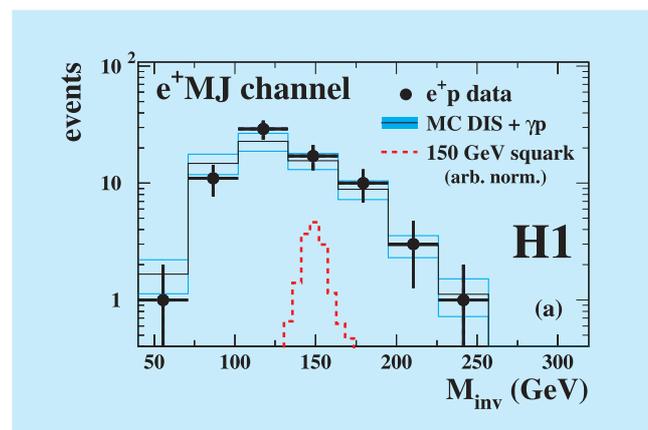


Abbildung 13: Spektrum der Elektron-Multijet-Masse verglichen mit der Erwartung des Standardmodells. Gestrichelt eingezeichnet ist die Erwartung für ein Squark der Masse 150 GeV in frei gewählter Normalisation.

exemplarisch für die Ereignisklasse Elektron + Multijet gezeigt. Aus der Nichtbeobachtung von Squarks kann man eine obere Grenze für deren Produktionswahrscheinlichkeit bestimmen und damit Einschränkungen der möglichen Parameter supersymmetrischer Modelle herleiten. Diese ergeben z. B., dass für eine Stärke der hier relevanten R-paritätsverletzenden supersymmetrischen Kopplung λ in der Größenordnung der elektromagnetischen Kopplungsstärke die Existenz von Squarks unterhalb einer Masse von 275 GeV ausgeschlossen werden kann.

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik gibt keine Erklärung für die Massen der elementaren Teilchen. Besonders das Top-Quark zeichnet sich durch seine extrem große Masse von 178 GeV aus, eine bislang nicht verstandene Tatsache. Auch in supersymmetrischen Modellen fällt dem Partner des Top, dem Top-Squark oder Stop, möglicherweise eine besondere Rolle zu. In der zweiten Veröffentlichung zur Supersymmetrie wird nach einem speziellen Zerfallskanal, dem bosonischen Zerfall des Stop gesucht. Das in der Fusion von Positron und Down-Quark produzierte Stop zerfällt dabei in ein Beauty-Squark und ein reelles W-Boson. Wenn das W-Boson in Lepton und Neutrino zerfällt, haben diese Ereignisse die Topologie der oben schon erwähnten, bei H1 gefundenen Ereignisse mit einem Lepton, einem Jet und fehlendem Transversalimpuls. In der speziell für die Stop-Suche durchgeführten Analyse wurden diese Ereignisse auch wiedergefunden, jedoch konnte im hadronischen Zerfall des W kein äquivalentes Signal etabliert werden. Somit ist diese Interpretation der Ereignisse nicht wahrscheinlich. Aus der Nichtbeobachtung eines signifikanten Signals kann eine Masse des Top-Squarks unterhalb von 260 GeV ausgeschlossen werden, sofern das Top-Squark mit der Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung koppelt.

In der dritten Veröffentlichung zur Supersymmetrie wurde nicht nach Squarks sondern nach supersymmetrischen Partnern der Eichbosonen gesucht. Im untersuchten Kanal produziert das einlaufende Elektron unter Austausch eines Selektrens, des supersymmetrischen Partners des Elektrons, mit einem Quark des Protons ein Neutralino und ein auslaufendes Quark, das als Teilchenjet nachgewiesen wird. Das Neutralino zerfällt in diesem Szenario dann in ein Photon und ein Gravitino (supersymmetrischer Partner des Gravitons), das den Detektor unbeobachtet verlässt. Die gesuchte Ereignis-

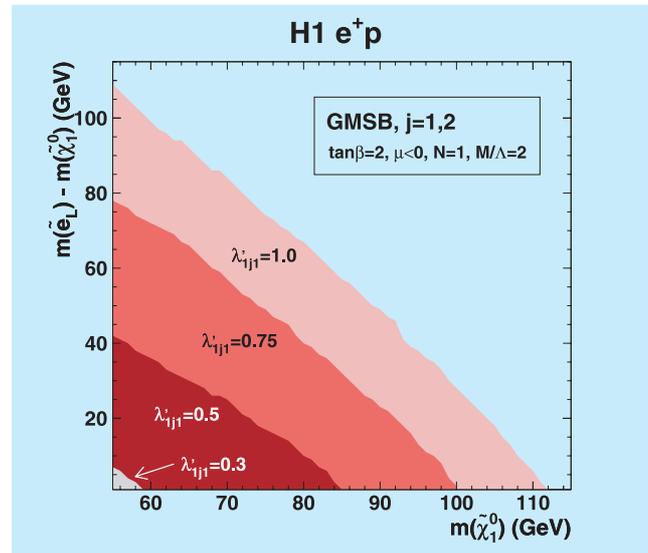


Abbildung 14: Ausschlussbereiche (dunkle Flächen) für die Masse des Neutralinos und die Massendifferenz zwischen Neutralino (χ) und Selektion als Funktion der Stärke λ der R-paritätsverletzenden Kopplung.

topologie besteht daher aus einem Jet, einem Photon und einer dem Gravitino zugeschriebenen Unbalance des Transversalimpulses. Nach der Selektion bleibt in den Daten nur ein einziges Ereignis übrig, in guter Übereinstimmung mit der Erwartung des Standardmodells, die durch radiative Charged-Current-Ereignisse gegeben ist. Aus der Nichtbeobachtung eines signifikanten Signals können im Rahmen spezifischer Modelle der Supersymmetrie Grenzen für die Masse des Neutralinos und die Massendifferenz zwischen Neutralino und Selektion gewonnen werden. Diese Grenzen, die in Abbildung 14 gezeigt sind, sind unabhängig vom Squarksektor des Modells. Unter der Annahme einer Kopplungsstärke von $\lambda = 1$ können untere Grenzen für die Masse des Selektrens von bis zu 112 GeV und des Neutralinos von bis zu 164 GeV erreicht werden.

Die letzte der fünf Veröffentlichungen zur Suche nach Physik jenseits des Standardmodells beinhaltet die Suche nach magnetischen Monopolen. Dirac zeigte 1931, dass magnetische Monopole eine Erklärung der Quantisierung der elektrischen Ladung liefern. Bisher hatten alle Suchen nach diesen Teilchen negative Resultate. H1 ist das erste Experiment, in dem

nach der Produktion von magnetischen Monopolen in hochenergetischer Elektron-Proton-Streuung gesucht wird. In diesen Streuprozessen produzierte Monopole würden aufgrund ihrer extrem hohen Ionisationsdichte mit großer Wahrscheinlichkeit im Material des den Wechselwirkungspunkt umgebenden Strahlrohres permanent steckenbleiben. Teile des in den Jahren 1995–1997 verwendeten Strahlrohres wurden in einem SQUID (Superconducting Quantum Mechanical Interference Device) auf das Vorhandensein magnetischer Monopole hin untersucht. Während beim Durchgang eines Dipols die beiden Pole genau gleich große, jedoch entgegengesetzte Ströme in der Leiterschleife induzieren, die sich nach dem Durchgang daher vollständig kompensieren, würde beim Passieren eines Monopols ein permanenter Strom in der hochempfindlichen supraleitenden Leiterschleife induziert. Die Untersuchung vieler einzelner Teilstücke des Strahlrohrs ergab keinen Hinweis auf das Vorhandensein eines magnetischen Monopols. Dieses Nullresultat erlaubt es, die in Abbildung 15 dargestellten oberen Grenzen für die Produktionsrate von Monopolen als Funktion der Monopolmasse und Monopolstärke zu bestimmen.

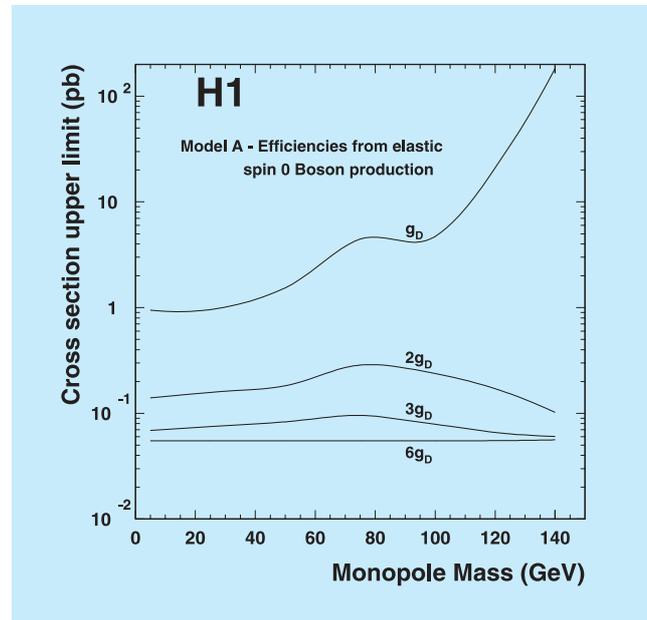


Abbildung 15: Obere Grenze des Wirkungsquerschnitts für die Produktion eines magnetischen Monopols als Funktion der Monopolmasse für Monopolstärken von einer bis zu 6 Diracmonopoleinheiten (g_D).