

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 und 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, ITEP und Lebedev Inst. Moscow, MPI Phys. München, Univ. Paris-Sud Orsay, Ec. Polytech. Palaiseau, Univ. Paris VI und VII, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rome, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: E. Elsen, DESY (bis August 2002); M. Klein, DESY (ab August 2002)

Das H1-Experiment ist der Untersuchung der Proton-Struktur sowie der Suche nach neuen Phänomenen in der Streuung von Positronen und Elektronen an Protonen bei höchsten Energien gewidmet. Nach Abschluss der ersten Messphase bei HERA hat die H1-Kollaboration jetzt das Ziel, Messungen mit besonders hoher Präzision in einem durch neue Detektoren und hohe Luminosität erweiterten kinematischen Bereich durchzuführen. Bei der Inbetriebnahme von HERA in der neuen Konfiguration der Wechselwirkungszone stellte sich heraus, dass der durch die Protonen- und Positronenstrahlen induzierte Teilchenuntergrund zu hoch ist, um HERA bei hoher Luminosität betreiben zu können. Deshalb wurden umfangreiche Studien in Zusammenarbeit mit Experten der HERA-Maschine gemacht, durch die das Verständnis für den umgebauten Beschleuniger und die Betriebsbedingungen des H1-Detektors wesentlich vertieft wurde.

Im Lauf des Jahres 2002 wurden alle neuen Detektorkomponenten in Betrieb genommen und Daten aufgezeichnet, die der Eichung der Detektoren, der Programmentwicklung und der physikalischen Analyse dienen. Der Detektor wurde durch neue Spurdetektoren zur Messung von geladenen Teilchen, die nach vorn, das heißt in Protonenstrahlrichtung erzeugt werden, erheblich verbessert. Abbildung 3 zeigt den neuen Siliziumdetektor (FST), der in Verbindung mit den neuen Vorwärtsspur-

kammern eine wesentliche Rolle bei der Messung von Mesonen mit schweren Quarks und dem Nachweis stark gestreuter Elektronen spielt. Abbildung 4 zeigt Spuren geladener Teilchen im FST.

Wichtige Vorarbeiten wurden für die vorgesehene Unterbrechung des Beschleunigerbetriebes im Frühjahr 2003 geleistet. Neben verschiedenen Verbesserungen an der Apparatur wird in dieser Zeit die Akzeptanz für diffraktive Prozesse durch einen neuen Detektor vergrößert werden, der in 220 m Abstand vom H1-Detektor in Protonenstrahlrichtung installiert wird. Darüber hinaus wird ein neuartiges Polarimeter installiert, das eine zusätzliche sehr präzise Bestimmung der longitudinalen Polarisation des Elektronen- bzw. Positronenstrahls ermöglichen wird.

Mehrere Veröffentlichungen des Jahres 2002 befassten sich mit Reaktionen der tiefunelastischen Streuung. Sie wurden mit Rechnungen verglichen, die auf der Theorie der starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik (QCD), beruhen. Dies betraf die Erzeugung von hadronischen Jets und von Vektormesonen sowie die Suche nach speziellen Phänomenen, den so genannten Odderon- und Instanton-induzierten Prozessen. Einige Arbeiten befassten sich mit der unelastischen Erzeugung von J/ψ -Teilchen, die mit der am Fermilab (USA) untersuchten Proton-Antiproton-Streuung verglichen werden



Abbildung 3: Der FST vor dem Einbau in den H1-Detektor mit seinen drei Teilen: einem Siliziumstreifendetektor mit 7 Detektorebenen (links), der Taktverteiler- und Signaltreiberelektronik (Mitte) sowie dem Kontakt-ring (rechts) zum Anschluss der Signal- und Kühlwasserleitungen.

kann und interessante Tests von QCD-Rechnungen erlaubt. Einen weiteren Schwerpunkt im Berichtsjahr stellten der Nachweis von Ereignissen mit einem isolierten Lepton und fehlendem Transversalimpuls sowie die Suche nach angeregten Elektronen dar.

Mit der Aussicht auf hohe Luminosität und longitudinal polarisierte Positronen- und Elektronenstrahlen steht dem H1-Experiment eine interessante Zukunft bevor.

Der H1-Detektor

Die mit dem neuen H1 Luminositätsmonitor von Mitte April 2002 bis Ende Februar 2003 registrierte Luminosität betrug gut 12 pb^{-1} ; davon konnten allerdings nur knapp 3 pb^{-1} mit voller Hochspannung in den zentralen Driftkammern aufgenommen werden.

Mit allen neuen Detektorkomponenten konnten erste Erfahrungen im Strahlbetrieb gemacht werden. Für den Siliziumspurdetektor in Vorwärtsrichtung beträgt die Signalamplitude das 32-fache des thermischen Rauschens – ein sehr guter Wert. Die Messgenauigkeit wurde zu $12 \mu\text{m}$ bestimmt. Im nachfolgenden Vorwärts-spurdetektor werden geladene Teilchen in nun 14 plana-

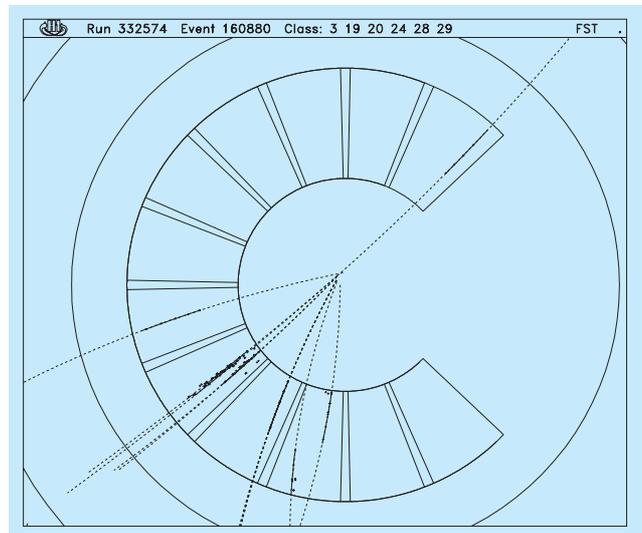


Abbildung 4: Darstellung der Signale von Spuren geladener Teilchen, die im neuen Vorwärts-Siliziumstreifendetektor (FST) des H1-Experiments rekonstruiert wurden.

ren Driftkammern in 5 Orientierungen nachgewiesen. Eine vereinheitlichte Überwachung und Steuerung der Hochspannung aller Drift- und Proportionalkammern, basierend auf kommerzieller Software, wurde erfolgreich eingeführt und hat den Schichtbetrieb vereinfacht. In der Datennahme konnte der Untergrund durch Verwendung von Flugzeitinformation im Rückwärtskalorimeter SpaCal auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Eine Verbesserung ist von der Bestimmung des Kollisionsorts mit der neuen inneren Proportionalkammer zu erwarten. Allerdings ist hier die Elektronik durch Überhitzung geschädigt worden. Es konnten jedoch mit zwei aus fünf Lagen korrekte Triggersignale geliefert werden. Die zentrale Driftkammer ist in optimalem Zustand, was unter anderem durch die Beobachtung von Teilchen mit Strangeness und Charm mit der erwarteten Massenauflösung belegt wurde. Die SpaCal- und Flüssig-Argon-Kalorimeter, zentrale Komponenten des H1-Detektors, lieferten zuverlässig Daten zur Analyse von tiefunelastischen Ereignissen und zum Verständnis des Strahluntergrunds.

Die noch ausstehenden Erweiterungsprojekte sind energisch fortgeführt worden. Für den schnellen Spurtrigger, der Signale der zentralen Driftkammer verwendet, sind alle Elektronikkomponenten installiert und erste Tests erfolgreich durchgeführt worden. Die Er-

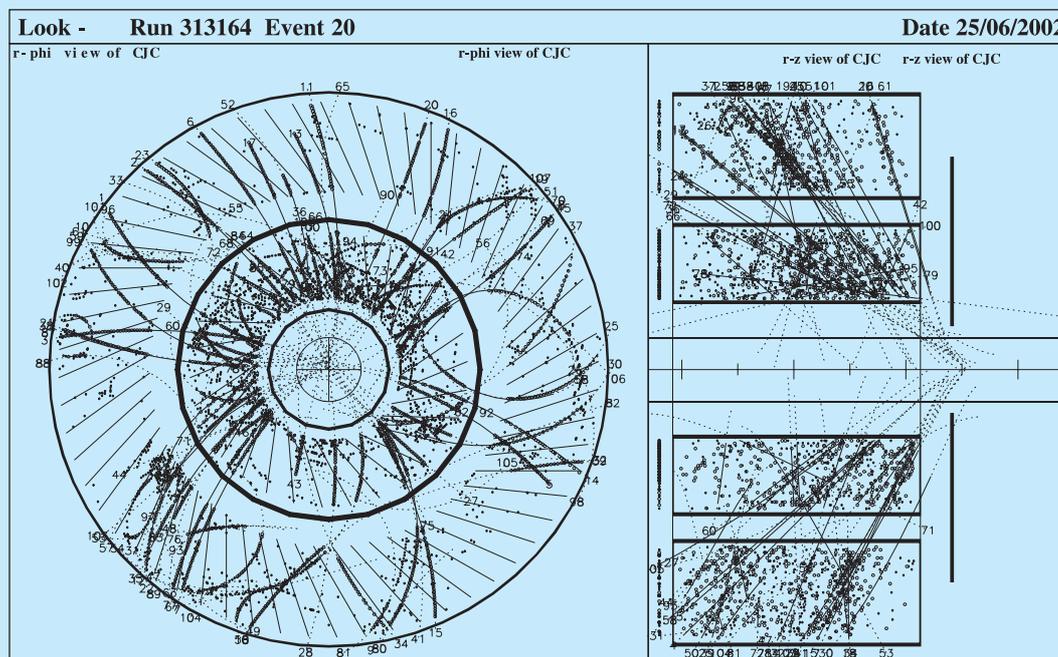


Abbildung 5: Ein typisches Proton-induziertes Untergrundereignis in der zentralen Spurkammer von H1. Aus der Seitenansicht (rechts) wird deutlich, dass es sich um eine Wechselwirkung mit einer Synchrotronstrahlungsblende im rückwärtigen Teil des Strahlrohrs handelt.

weiterung des Vorwärts-Protonenspektrometers bis 220 m vom Kollisionspunkt mit Faserdetektoren in beweglichen Ansätzen am Strahlrohr und einer 9 m langen Umleitung für die Heliumleitungen ist bereit zum Einbau.

Anfang März 2003 wurde der Strahlbetrieb für gut vier Monate unterbrochen, um weitere Maßnahmen zur Reduktion des Untergrundes, unter anderem Einbau einer Ionengetterpumpe innerhalb von H1, sowie Reparaturen am Detektor, unter anderem Austausch der Elektronik an der inneren Proportionalkammer und Verbesserung der Kühlung, durchzuführen.

Detektorbetrieb bei HERA II

Bereits zu Beginn des Jahres 2002 wurde deutlich, dass Strahlströme von wenigen mA zu unakzeptabel hohen Untergrundraten in den Siliziumdetektoren und den empfindlichen Drahtkammern führen. Eine vertikale

Aperturbegrenzung auf der rückwärtigen Seite des Detektors wurde als Quelle für zurückgestreute Synchrotronstrahlung identifiziert und in einer Betriebspause im März beseitigt. Nach dieser Modifikation ergaben detaillierte Messungen des durch Synchrotronstrahlung bedingten Untergrundes, dass der nach sorgfältiger Optimierung der Strahlage verbleibende Untergrund in guter Übereinstimmung mit den Simulationsrechnungen war. Bei erhöhter Positronenstrahl-Intensität zeigte sich, dass der Untergrund nichtlinear vom Strahlstrom abhängt. Dieses Verhalten ließ sich auf Wechselwirkungen des Positronenstrahls mit dem Restgas im Strahlrohr zurückführen unter der Annahme, dass das Strahlvakuum durch den Positronenstrahl verschlechtert wird. Eine solche Verschlechterung des Vakuums wird wegen der auftretenden Desorption von Gasmolekülen von den Wänden des Strahlrohrs erwartet, die durch Synchrotronstrahlung und lokale Erwärmung durch elektromagnetische Verluste des Positronenstrahls, insbesondere während der Injektion bei einer Energie von 12 GeV, hervorgerufen wird.

Extrapolationen zu den angestrebten Sollwerten von 105 mA Protonenstrom und 55 mA Positronenstrom ergeben jedoch, dass der weitaus größte Beitrag zum Untergrund im H1-Detektor von Protonenstrahl-induzierten Wechselwirkungen mit dem Restgas im Strahlrohr zu erwarten ist. Bei unveränderten Bedingungen würde der zu erwartende Kammerstrom den tolerierbaren Wert um ein Vielfaches übersteigen. Eingehende Vergleiche von Messergebnissen mit detaillierten Monte Carlo-Simulationen im Bereich von ± 60 m um den Wechselwirkungspunkt erklären Ereignisse wie das in Abbildung 5 gezeigte folgendermaßen: Bei dem zweistufigen Prozess eines vom Protonenstrahl herührenden Untergrundereignisses geht zuerst ein Proton vor Erreichen des H1-Detektors eine Wechselwirkung mit einem Restgasatom ein. Eines der zahlreichen bei einer solchen Kollision entstehenden Sekundärteilchen trifft in einem zweiten Schritt innerhalb des H1-Detektors auf das Strahlrohr oder eine der in dem Strahlrohr befindlichen Blenden und löst einen weiteren Schauer aus, der viele Spuren im Detektor hinterlässt. Die Rate solcher Ereignisse hängt, wie im zuvor diskutierten Fall, vom Strahlvakuum und damit auch von der Positronenstrahl-Intensität ab.

Als eines der wesentlichen Ziele auf dem Weg zum Erreichen der Soll-Luminosität von HERA II muss daher eine signifikante Verbesserung des Strahlrohrvakuums in und um die Wechselwirkungszone angesehen werden. In enger Zusammenarbeit mit Experten der Beschleunigergruppe und der anderen HERA-Experimente wurden zahlreiche Testmessungen durchgeführt, um den Mechanismus der dynamischen Vakuumverschlechterung zu untersuchen. Ebenso wurde untersucht, ob Änderungen des Detektors, wie zum Beispiel eine modifizierte Abschirmung, eine veränderte Betriebstemperatur der neuen supraleitenden Strahlführungselemente innerhalb des Detektors oder lokal erhöhte Pumpleistungen, eine signifikante Verbesserung erwarten lassen.

Abbildung 6 zeigt anhand des zeitlichen Verlaufs des Vakuumrohrdrucks in der Wechselwirkungszone, bestimmt aus der im Luminositätsmonitor gemessenen Rate von Positron-Gas-Wechselwirkungen, dass im Laufe des Jahres deutliche Verbesserungen des Strahlrohrvakuums eingetreten sind. Durchaus vergleichbare Verbesserungen des Vakuums innerhalb von Monaten beobachtete man auch als Folge der Betriebsunter-

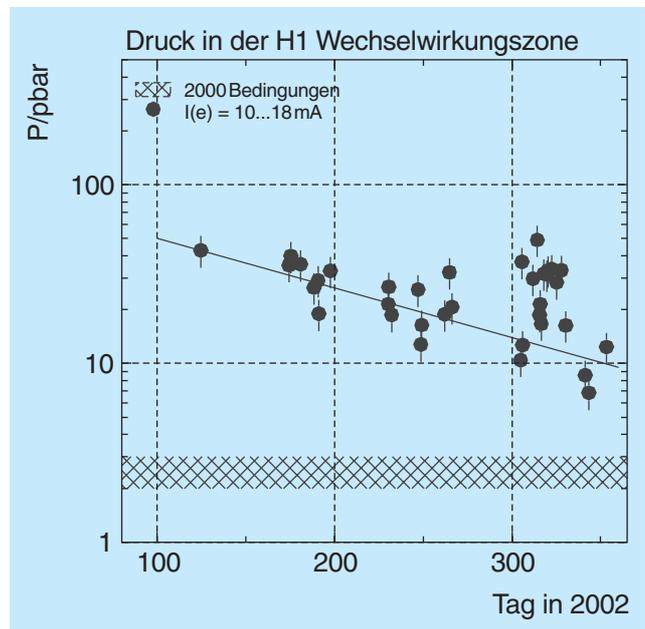


Abbildung 6: Der Druck im Vakuumrohr des H1-Detektors, gemessen im Luminositätsmonitor über die Positron-Gas-Wechselwirkungsrate, nahm im Verlauf des Jahres 2002 ab. Die um den Tag 310 beobachtete Erhöhung des Drucks ist eine Folge der zu Testzwecken erhöhten Temperatur des Hitzeschildes der supraleitenden Strahlführungsmagnete in der Nähe der Wechselwirkungszone.

brechung 1994/95. Wie Abbildung 6 jedoch auch zeigt, ist nun noch ein wesentlicher Schritt erforderlich, um vergleichbare Werte wie im Jahre 2000 zu erreichen.

Physikalische Ergebnisse

Das Schwergewicht der Aktivitäten lag, abgesehen von der Inbetriebnahme des Detektors und der Optimierung des Strahlbetriebs, in der Auswertung der zahlreichen Messdaten von HERA I. Im Folgenden werden wichtige, im Berichtsjahr abgeschlossene Analysen etwas näher erläutert.

Jets, Instantonen und QCD

Eine der Hauptaufgaben ist die kritische Überprüfung der Theorie der starken Wechselwirkung, der Quan-

tenchromodynamik (QCD), in den durch HERA neu erschlossenen Bereichen des Phasenraumes. Bei der Kollision von Positronen und Protonen stößt das vom Lepton emittierte virtuelle Photon ein Quark aus dem Proton heraus, das mit den im Proton eingeschlossenen Quarks und Gluonen zunächst noch durch die Farbkraft verbunden ist. Entlang der Verbindung werden aus dem Vakuum neue Quark-Antiquark-Paare gebildet. Die Quarks strahlen Gluonen ab, die wiederum in Quark-Antiquark-Paare fluktuieren. Die Ausbildung solcher Teilchen-Kaskaden wird mit Hilfe der QCD untersucht. Bei den hohen Energien bei HERA erscheinen die nach diesem komplizierten Muster erzeugten Quarks und Gluonen oft als ausgeprägte Teilchenbündel, so genannte Jets. Durch die Messung von Jets erhält man ein Bild von der ursprünglichen Quark-Gluon-Kaskade, das mit der Theorie verglichen werden kann.

Im Berichtsjahr wurde eine Studie zur inklusiven Jet-Erzeugung in tiefunelastischer Streuung veröffentlicht. Die Messung wurde bei quadrierten Impulsüberträgen Q^2 vom Positron auf das Proton im Bereich von $5 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$ durchgeführt und ist eine Fortsetzung früherer Studien bei größerem Q^2 . Die Jet-Erzeugung wurde in Abhängigkeit von Q^2 , von E_T , der transversalen Energie der Jets, und η , der Pseudorapidität der Jets, gemessen. Die Variable η ist ein Maß für den Erzeugungswinkel der Jets relativ zur Strahlrichtung, wobei negative Werte von η der rückwärtigen Hemisphäre (Seite des auslaufenden Elektronenstrahls) und positive Werte der Seite des auslaufenden Protonenstrahls entsprechen. Abbildung 7 zeigt die gemessenen Wirkungsquerschnitte für Jet-Erzeugung als Funktion von E_T in drei verschiedenen Bereichen von η . Die Daten werden mit QCD-Störungsrechnungen in führender (LO) und nächst höherer Ordnung (NLO) der starken Kopplungskonstanten α_s verglichen, wobei die Unsicherheit der NLO-Rechnung als Fehlerband dargestellt ist. Die relative Differenz zwischen Daten und QCD-Rechnung ist zur Verdeutlichung in linearer Skala im unteren Teil der Abbildung aufgetragen.

Die QCD-Rechnungen stimmen mit den Messergebnissen gut überein, mit Ausnahme der Vorwärtsrichtung bei kleinen E_T , wo die Übereinstimmung mit den Messergebnissen nur mäßig ist. Eine genauere Inspektion zeigt, dass diese Abweichungen durch Streuereignisse bei kleinen $Q^2 < 20 \text{ GeV}^2$ verursacht werden. Dabei ist

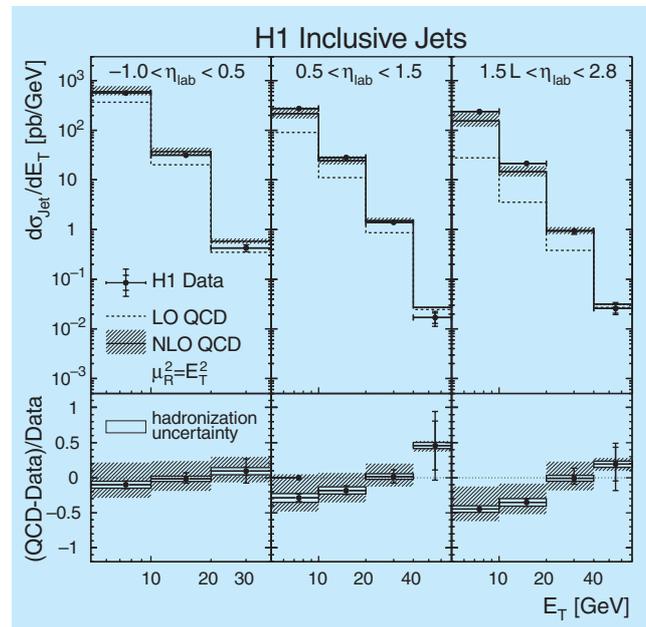


Abbildung 7: Wirkungsquerschnitte für die Elektroproduktion von Teilchen-Jets als Funktion der Transversalenergie E_T für drei Winkelbereiche (η_{lab}) der Jets. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen der Theorie der starken Wechselwirkung (QCD), gerechnet in führender (LO) und nächst höherer (NLO) Ordnung. Der untere Bereich der Figur zeigt die relativen Abweichungen zwischen Daten und QCD-Erwartung. Abgesehen vom Bereich kleiner E_T -Werte in Vorwärtsrichtung ($1.5 < \eta_{\text{lab}} < 2.8$) werden die Daten im Rahmen der Unsicherheit der Erwartung gut durch NLO QCD beschrieben.

bemerkenswert, dass die Beschreibung der Daten durch die in diesem Bereich sehr großen NLO-Korrekturen von etwa einem Faktor drei schon erheblich verbessert wurde, was die Vermutung nahelegt, dass Beiträge der nächst höheren Ordnung (NNLO QCD) nicht zu vernachlässigen sind. Solche Berechnungen liegen aber noch nicht vor.

Es handelt sich bei den QCD-Rechnungen um die sogenannte DGLAP-Approximation der Evolution der Quark-Gluon-Kaskade. Diese Approximation erlaubt somit eine gute Beschreibung der Jet-Erzeugung, mit Ausnahme der Vorwärtsrichtung bei niedrigen Transversalenergien der Jets. Künftige QCD-Rechnungen in NNLO könnten zeigen, ob die DGLAP-Evolution

auch hier zur Beschreibung genügt, oder ob andere Modelle der Evolution, zum Beispiel die so genannte BFKL-Evolution, besser geeignet sind.

In nicht-Abelschen Eichtheorien, insbesondere der QCD, können komplexe topologische Strukturen des Vakuums auftreten. Als Instantonen werden Tunnelprozesse von einem Vakuumzustand in einen anderen, der zwar energetisch äquivalent, aber topologisch verschieden ist, bezeichnet. Diese im Rahmen des Standardmodells erwarteten, nicht perturbativen Prozesse sind experimentell noch nicht nachgewiesen worden. Es wird jedoch vorausgesagt, dass ein sehr kleiner Teil der bei HERA beobachteten ep-Ereignisse auf Instanton-Prozessen beruht. Bei diesen Prozessen wird eine große Anzahl von Hadronen im Endzustand erwartet, die aus einer feuerballartigen Erzeugung von Quarks aller Arten stammen. Eine Entdeckung dieser Prozesse wäre eine neuartige Manifestation der Struktur nicht-Abelscher Eichtheorien.

Die H1-Kollaboration hat etwa 375 000 tiefunelastische ep-Streuereignisse mit $Q^2 > 2 \text{ GeV}^2$ auf für Instanton-induzierte Prozesse typische Signaturen hin untersucht und fand 410 Ereignisse, also etwa ein Tausendstel der Ereignisse, welche die gewählten Bedingungen erfüllten. Bei der detaillierten Simulation gewöhnlicher Streuereignisse ohne Instanton-Prozesse erfüllt jedoch eine ähnliche, wenn auch etwas kleinere Zahl von Ereignissen die Kriterien. Die Unsicherheiten der Messung und der Simulation des hadronischen Endzustandes erlauben bisher nicht, aus einem kleinen Überschuss in einem speziellen Phasenraumgebiet auf Instanton-induzierte Prozesse zu schließen.

Es können jedoch obere Grenzen für die Wirkungsquerschnitte mit Instanton-induzierten Prozessen angegeben werden. Die konservativste Grenze unter der Annahme, dass die selektierten Ereignisse keinen Anteil an Standard-Ereignissen haben, liegt um einen Faktor fünf über der theoretischen Erwartung. Diese erste Untersuchung schließt daher zwar sehr große Instanton-Beiträge bei HERA aus, kann aber die theoretische Erwartung weder bestätigen noch widerlegen. Es bleibt zukünftigen Untersuchungen vorbehalten, mit höheren Ereignisraten bei großen Impulsüberträgen und mit weiterem Fortschritt im theoretischen Verständnis der Hadron-Erzeugungsprozesse, eine den erwarteten Instanton-Wirkungsquerschnitten entsprechende Empfindlichkeit zu erreichen.

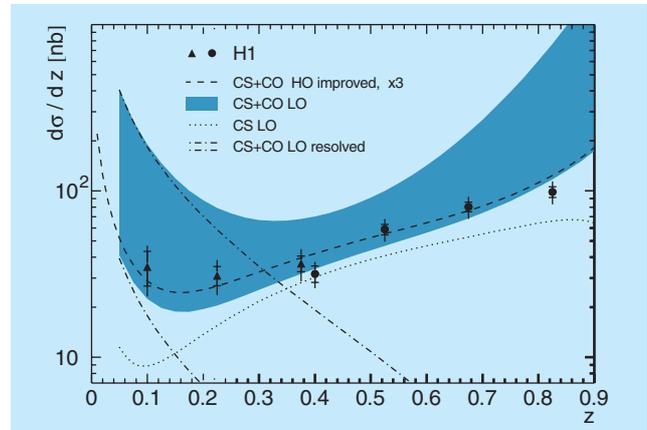


Abbildung 8: Wirkungsquerschnitt für die unelastische Photoproduktion von J/ψ -Mesonen als Funktion der Elastizität z (Energie des J/ψ -Mesons relativ zur Photon-Energie). Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) liegen oberhalb der Erwartung des „Colour Singlet“-Modells (CS LO, gepunktete Kurve), sind jedoch gut vereinbar mit Voraussagen, die auch „Colour Octet“-Beiträge beinhalten (CS+CO LO, dunkles Band).

Unelastische Charmonium-Produktion

Zwei Veröffentlichungen berichten über die unelastische Produktion von J/ψ -Mesonen durch Positron-Proton-Kollisionen in einem im Vergleich zu früheren Messungen erheblich erweiterten kinematischen Bereich. Messungen der Wirkungsquerschnitte sind von großem Interesse, da sie Vergleiche mit aktuellen QCD-Rechnungen erlauben und somit zu einem besseren Verständnis für den Mechanismus der Erzeugung von schweren Quarks beitragen. Hierbei geht es vor allem um die Frage der Farbübertragung. Das J/ψ -Meson ist, wie alle Hadronen, farbneutral (man spricht von „Colour Singlet“ (CS) Zuständen), das c-Quark und c-Antiquark, aus welchen das J/ψ -Meson aufgebaut ist, entstehen aber aus einem farbigen Gluon, das kurzfristig in ein Quark-Antiquark-Paar fluktuiert. Wo bleibt die Farbladung? Zwei verschiedene Modelle versuchen dies zu erklären:

- In dem „Colour Singlet“ Modell strahlt eines der Quarks ein Gluon ab, wodurch Farbe übertragen, jedoch der Endimpuls des J/ψ -Mesons merkbar beeinträchtigt wird.

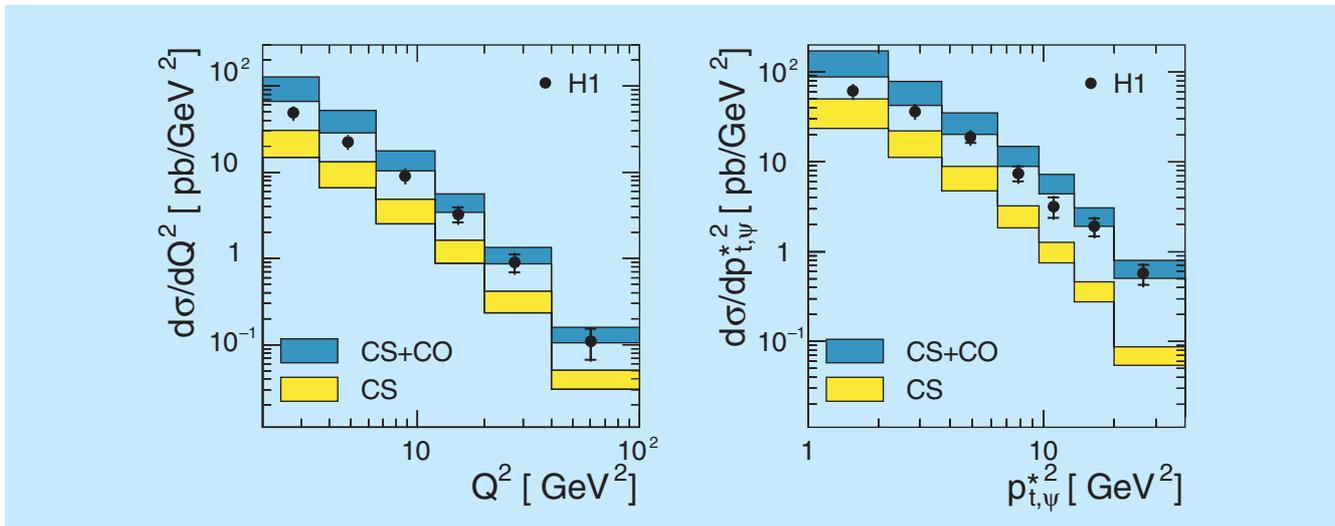


Abbildung 9: Wirkungsquerschnitte für die unelastische Elektroproduktion von J/ψ -Mesonen als Funktion des quadrierten Impulsübertrages Q^2 und des quadrierten Transversalimpulses $p_{t,\psi}^{*2}$ des J/ψ -Mesons. Die gemessenen Verteilungen (Punkte mit Fehlerbalken) werden recht gut durch Modellrechnungen beschrieben, die sowohl „Colour Singlet“- (CS) als auch „Colour Octet“-Beiträge (CS+CO) enthalten, wohingegen die Daten reine CS-Beiträge ausschließen.

- In dem „Nicht-relativistischen QCD-Modell“ (NRQCD) werden Quark-Antiquark-Paare sowohl als farbneutrale „Colour-Singlet“ als auch als farbige „Colour Octet“ (CO) Zustände erzeugt. Die Farbladung wird hier durch Abstrahlung von sehr weichen Gluonen weggetragen, welche in erster Näherung den Impulszustand des J/ψ -Mesons nicht verändern. Der relative Anteil von CO-Zuständen wird im Modell nicht vorausgesagt und muss durch Vergleich mit Messdaten angepasst werden.

Das NRQCD-Modell konnte die am Fermilab in Proton-Antiproton-Kollisionen beobachtete J/ψ -Erzeugung erfolgreich durch einen Beitrag von CO-Zuständen erklären.

Die H1-Daten zur unelastischen J/ψ -Erzeugung umfassen den Q^2 -Bereich $0 < Q^2 < 100$ GeV², das heißt sowohl Photoproduktion als auch tiefunelastische Streuung. Die Wirkungsquerschnitte konnten differenziell in mehreren Variablen bestimmt werden. Einige Photoproduktions-Resultate werden in Abbildung 8 gezeigt, wo die Wirkungsquerschnitte als Funktion der Elastizität z , des relativen Anteils des J/ψ -

Mesons an der gesamten übertragenen Energie des Photons, aufgetragen sind und mit den erwähnten QCD-Modellrechnungen verglichen werden. Man sieht, dass die gepunktete Kurve (CS) unter den Daten liegt. Das Band repräsentiert die NRQCD-Rechnung unter Annahme eines CO-Anteils, wie er aus den Fermilab-Daten bestimmt worden ist. Die Fermilab-Daten zur inklusiven J/ψ -Erzeugung erscheinen daher mit den H1-Daten verträglich.

Abbildung 9 zeigt, dass die Abhängigkeit des gemessenen Wirkungsquerschnitts von anderen Größen durch die NRQCD-Rechnungen ebenfalls befriedigend beschrieben wird. Einzige Ausnahme sind die z -Verteilungen bei höheren Werten von Q^2 , wo signifikante, noch nicht verstandene Abweichungen von den Daten beobachtet werden (Abb. 10).

Insgesamt lässt sich sagen, dass die vorgelegten Messergebnisse interessante Vergleiche mit QCD-Rechnungen erlauben. So erscheint es möglich, die H1-Daten im Rahmen der NRQCD-Rechnungen zu beschreiben, obwohl auch klar ist, dass weitere Rechnungen zu Einflüssen höherer Ordnung erforderlich sind.

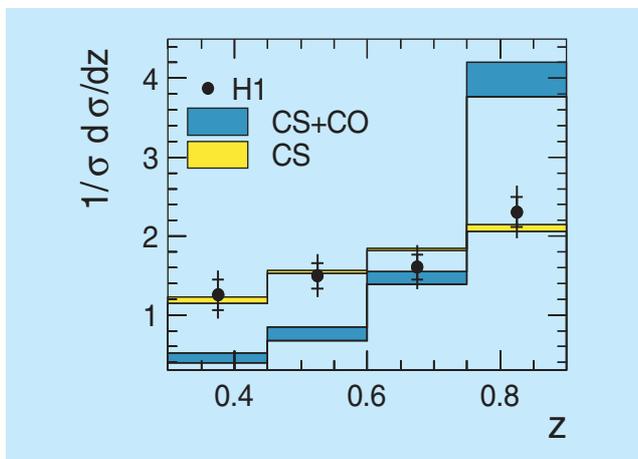


Abbildung 10: Wirkungsquerschnitte für die unelastische Elektroproduktion von J/ψ -Mesonen als Funktion der Elastizität z , des relativen Anteils des J/ψ -Mesons an der gesamten übertragenen Energie des Elektrons. Die gemessene Verteilung (Punkte mit Fehlerbalken) weicht deutlich von der NRQCD-Modellrechnung ab, die sowohl „Colour Singlet“- (CS) als auch „Colour Octet“-Beiträge (CS+CO) enthält. Dagegen werden die Daten durch reine CS-Beiträge gut beschrieben.

Diese Messungen tragen so zum Verständnis der Erzeugung gebundener Zustände schwerer Quarks in ep - und $p\bar{p}$ -Wechselwirkungen bei.

Diffraktive Prozesse

Einen wichtigen Bereich der Untersuchungen zur starken Wechselwirkung bei HERA bilden so genannte diffraktive Prozesse. Bei diesen Ereignissen, die in der tiefunelastischen Streuung etwa 10% des Gesamtwirkungsquerschnittes ausmachen, verliert das Proton nur einen kleinen Teil seiner Energie und bleibt entweder intakt oder dissoziiert in ein System kleiner Masse mit Proton-Quantenzahlen. Man spricht hier auch vom Pomeron-Austausch. Experimentelle Signatur solcher Ereignisse ist eine große Lücke in der Winkelverteilung des hadronischen Endzustandes in Richtung des Protonenstrahls, da in dem Prozess nur Vakuum-Quantenzahlen ausgetauscht werden. Als eine andere Signatur der diffraktiven Streuung dient für einen Teil der Ereignisse der direkte Nachweis des gestreuten, intakten Protons in den „Roman Pot“ Spektrometern,

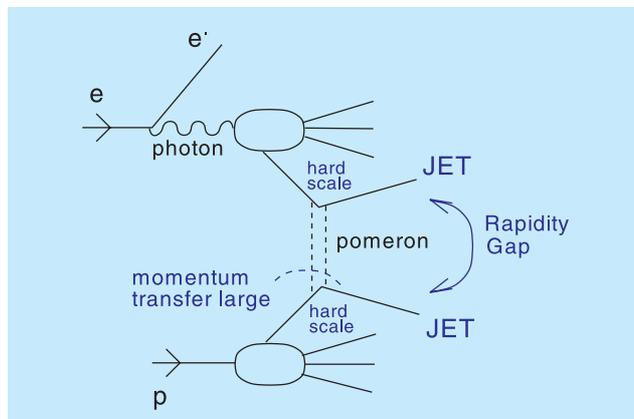


Abbildung 11: Diagrammatische Darstellung der Zwei-Jet-Erzeugung in ep -Streuung mit Rapiditäts-lücke zwischen den Jets.

die etwa 100 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt installiert sind.

Besonders interessant ist die Analyse diffraktiver Prozesse in der unelastischen Streuung oder in Ereignissen mit hohen Transversalimpulsen. Diese machen es möglich, die Struktur des diffraktiven Austausches im Rahmen der perturbativen QCD theoretisch zu beschreiben, zum Beispiel durch Zwei-Gluon-Austausch, im Gegensatz zur „weichen“ Diffraction.

Im Berichtsjahr wurden von der H1-Kollaboration mehrere Arbeiten über diffraktive Prozesse veröffentlicht. In einer dieser Arbeiten wurden Ereignisse mit zwei hochenergetischen Teilchen-Jets im hadronischen Endzustand selektiert und nach Anzeichen von diffraktivem Austausch zwischen den Jets gesucht. Wie in Abbildung 11 skizziert, können die Jets in einem „harten“ Streuprozess zweier Quarks erzeugt werden, wobei ein Quark aus dem virtuellen Photon und eines aus dem Proton stammt. In diesem Fall entsteht eine Rapiditätslücke zwischen den Jets durch Austausch eines farbneutralen Pomerons zwischen den beiden Quarks. Solche Prozesse sind besonders interessant, weil durch die hohe Energie bzw. den hohen Transversalimpuls der Jets eine „harte Skala“ gegeben ist, die Störungsrechnungen in der QCD erlaubt.

In Abbildung 12 ist der Wirkungsquerschnitt für Zwei-Jet-Erzeugung als Funktion der Transversalenergie E_T^{gap} aufgetragen, die in der Rapiditätslücke zwischen den Jets gemessen wird. Die Daten liegen bei kleinen E_T^{gap}

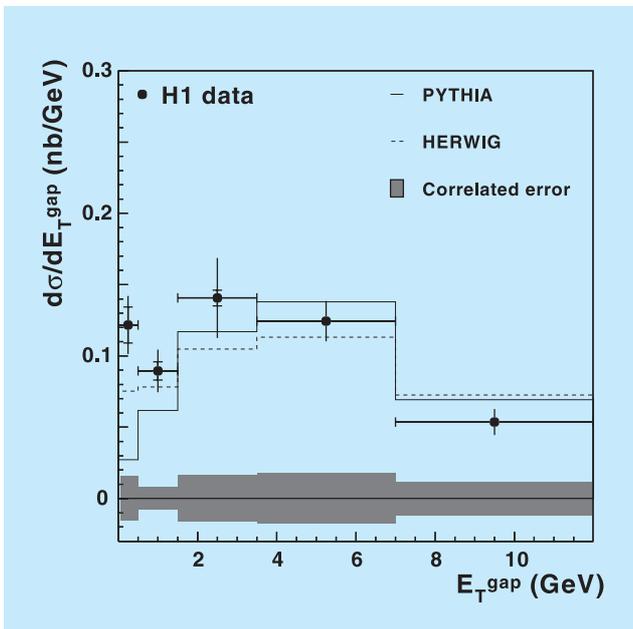


Abbildung 12: Wirkungsquerschnitt der Zwei-Jet-Erzeugung in Abhängigkeit von der deponierten Transversalenergie E_T^{gap} zwischen den Jets mit den jeweiligen höchsten Transversalenergien E_T . Das Band zeigt die Größe der systematischen Fehler. Bei niedrigen Werten von E_T^{gap} liegen die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) deutlich über den Modellrechnungen (durchgezogenes und gepunktetes Histogramm). Dies ist ein Hinweis auf den Austausch eines farbneutralen Objektes (Pomeron), ein Prozess, der nicht in den Modellrechnungen enthalten ist.

deutlich über den beiden in Abbildung 12 gezeigten Simulationsrechnungen, das heißt es gibt mehr Ereignisse mit ausgeprägten Rapiditätslücken als nach diesen Standardrechnungen erwartet wird. Dies ist ein Hinweis auf den Austausch eines farbneutralen Objektes, der in den Simulationsrechnungen nicht enthalten ist.

Der relative Anteil von etwa 10% solcher Ereignisse mit ausgeprägten Rapiditätslücken zwischen den Jets stimmt gut mit einem ähnlichen Ergebnis der ZEUS-Kollaboration überein. Das Ergebnis kann interessanterweise auch mit Resultaten aus der Proton-Antiproton-Streuung am Fermilab verglichen werden, wo ähnliche Ereignisse beobachtet wurden, und stellt einen weiteren Schritt zum Verständnis des Austauschs farbneutraler Objekte im Rahmen der QCD dar.

Auch die Studien von diffraktiven Prozessen mit exklusiven Endzuständen wurden in mehreren Veröffentlichungen fortgesetzt. Eine dieser Studien befasst sich mit der Elektroproduktion von ρ^0 -Mesonen, $ep \rightarrow e\rho^0 Y$, wobei Y entweder das intakte, gestreute Proton darstellt oder das dissoziierte System bezeichnet, in welches das Proton übergeht. Das gestreute Positron wurde im rückwärtigen SpaCal-Kalorimeter beobachtet, das heißt der Prozess fand bei mittleren quadrierten Impulsüberträgen statt, $2.5 < Q^2 < 60 \text{ GeV}^2$. Das ρ^0 -Meson wurde in der zentralen Jetkammer anhand der beiden geladenen Zerfalls-Pionen ($\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$) nachgewiesen. Der gemessene Bereich von quadrierten Impulsüberträgen t' vom Proton auf das System Y wurde im Vergleich zu früheren Studien erheblich erweitert ($0 < t' < 3 \text{ GeV}^2$). In der Analyse wurde die Spinübertragung vom virtuellen Photon auf das ρ^0 -Meson als Funktion von t' untersucht. Einige Resultate dieser Messung sind in Abbildung 13 dargestellt, in welcher so genannte Dichtematrix-Elemente als Funktion von t' aufgetragen sind.

Die herkömmliche Erwartung, dass die Helizität (Spin-Ausrichtung) des Photons bei der Streuung auf das erzeugte ρ^0 -Meson übergeht (s-Channel Helicity Conservation – SCHC) wird von den Daten nicht bestätigt. Die Abweichungen von SCHC werden mit steigenden Werten von t' immer größer. In neueren QCD-Störungsrechnungen, die in Abbildung 13 als Kurven dargestellt sind, wird diese SCHC-Verletzung aber erwartet und in einer Höhe vorausgesagt, die gut mit den jetzt gemessenen Daten übereinstimmt. In den dargestellten Modellrechnungen wird die Streuung des Photons am Proton durch Austausch von zwei Gluonen beschrieben. Das Photon befindet sich kurzfristig während der Streuung in einem Quark-Antiquark-Zustand, der in das ρ^0 -Meson übergeht. Die Helizitätsänderung, die eine Übertragung von Drehimpuls vom Proton auf das ρ^0 -Meson impliziert, erfordert im Modell eine asymmetrische Verteilung des Photon-Impulses auf das Quark und das Antiquark, die das ρ^0 -Meson bilden. Mit diesen Messungen konnten erstaunlich detaillierte Vorhersagen durch QCD-Rechnungen für eine Einzelreaktion bestätigt werden.

Im Rahmen der QCD kann das Pomeron als Kombination von zwei Gluonen beschrieben werden, die das einfachste System darstellt, das die Quantenzahlen

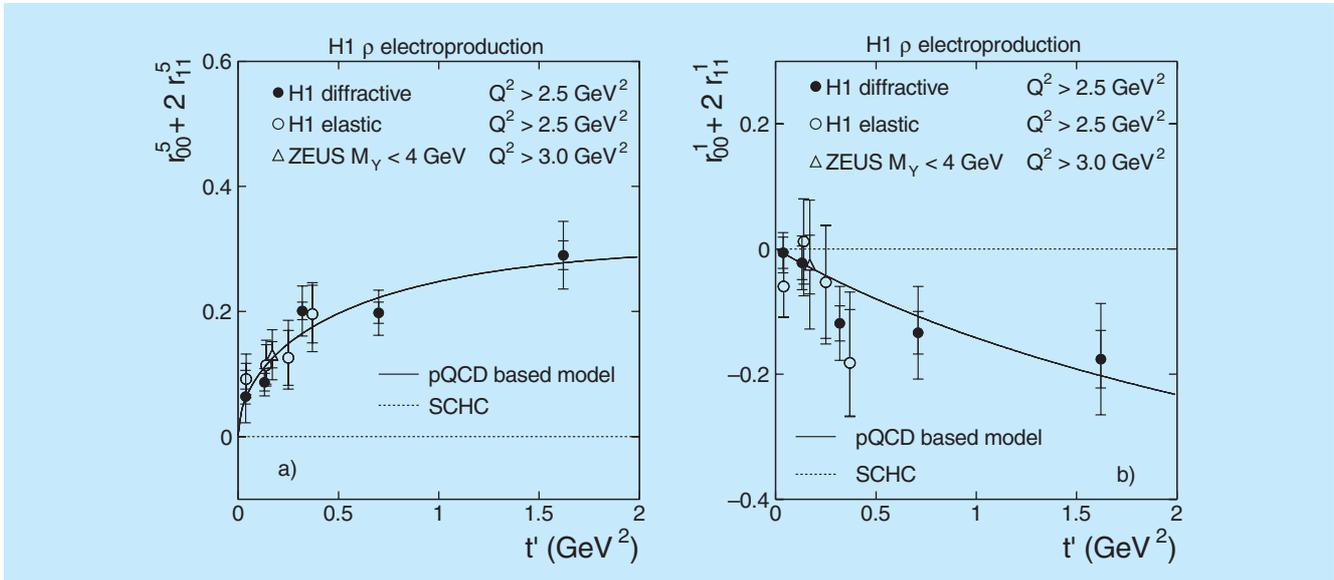


Abbildung 13: Zwei Kombinationen von Dichtematrix-Elementen in der Elektroproduktion von ρ^0 -Mesonen, gemessen als Funktion des quadrierten Proton-Impulsübertrages t' . Die Hypothese der Helizitätserhaltung (SCHC) ist als gepunktete Linie dargestellt. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) weichen mit steigendem t' hiervon ab, sind aber mit der QCD-Rechnung (durchgezogene Kurve) in guter Übereinstimmung.

des Vakuums besitzt. Somit kann diffraktive Streuung als ein Austausch von zwei Gluonen beschrieben werden. Die QCD sagt aber auch den Austausch von farbneutralen Gluon-Kombinationen höherer Multiplizität voraus. Die farbneutrale Kombination von drei Gluonen wird als Odderon bezeichnet, wobei das Odderon Quantenzahlen besitzt, die von denen des Pomerons abweichen. Insbesondere hat das Odderon C-Parität -1 , das Pomeron dagegen $C = +1$. Da das Photon die C-Parität -1 hat, führt die Streuung von Photonen am Pomeron zu Endzuständen mit $C = -1$, zum Beispiel zum Vektormeson ρ^0 , die Streuung von Photonen am Odderon hingegen zu Endzuständen mit $C = +1$. Letztere können zum Beispiel pseudoskalare Mesonen wie das π^0 oder Tensormesonen wie das $f_2(1270)$ sein. Das Odderon wurde schon 1982 in theoretische Überlegungen einbezogen, wobei es um den asymptotischen Verlauf des Hadron-Hadron-Wirkungsquerschnittes bei hohen Energien ging. Ein experimenteller Nachweis des Odderon blieb jedoch aus.

Theoretische Vorhersagen, unter Verwendung der perturbativen QCD, für Streuprozesse mit Austausch eines Odderons resultieren in sehr kleinen Wirkungsquer-

schnitten, die auch bei hoher Luminosität bei HERA kaum nachweisbar sind. Andererseits gibt es aber auch auf nicht-perturbativen Methoden basierende Voraussagen von erheblich höheren Wirkungsquerschnitten, die bei HERA experimentell nachweisbar sein müssten. Dies betrifft zum Beispiel den Prozess $ep \rightarrow e\pi^0 N^*$, für welchen im Rahmen des so genannten Modells des Stochastischen Vakuums ein sehr großer Wirkungsquerschnitt berechnet wurde. Eine experimentelle Suche nach diesem Prozess wurde in den H1-Daten von 1999–2000 durchgeführt. Für die Messung wurde das in Rückwärtsrichtung und dicht am Strahlrohr eingebaute VLQ (Very Low Q^2) Kalorimeter benutzt, in welchem die beiden Photonen aus dem π^0 -Zerfall, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, nachgewiesen wurden. Das vorwärts gestreute, angeregte Proton-System N^* , das in ein Neutron zerfällt, $N^* \rightarrow n\pi^+$, konnte mit dem bei 108 m nahe am Protonenring in der Vorwärtsrichtung installierten Neutron-Kalorimeter (FNC) nachgewiesen werden. Das gestreute Elektron wurde im ebenfalls dicht am Strahlrohr gelegenen Elektron-Kalorimeter (Elektron-Tagger) gemessen, so dass der Hauptdetektor (Drahtkammern und Flüssig-Argon-Kalorimeter) in diesen Ereignissen leer war.

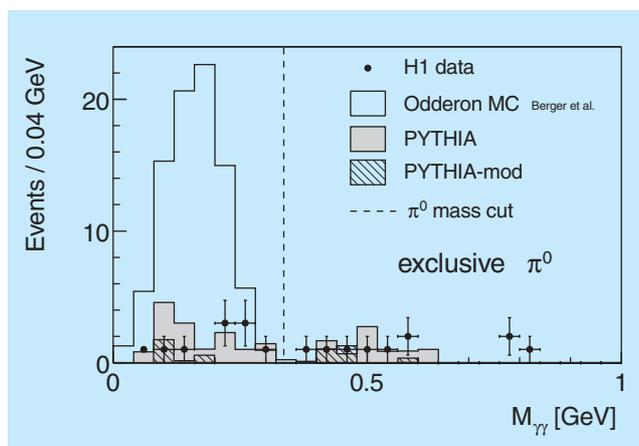


Abbildung 14: Verteilung der invarianten Zwei-Photon-Masse in Ereignissen des Prozesses $e + p \rightarrow \gamma\gamma + e + N^*$. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) liegen weit unter der theoretischen Voraussage der Odderon-induzierten π^0 -Erzeugung (offenes Histogramm) und sind mit dem erwarteten Untergrund (schraffiertes Histogramm) gut verträglich.

Das Ergebnis dieser Suche nach dem Odderon ist in Abbildung 14 dargestellt. Das vorhergesagte Signal wird nicht bestätigt, und die wenigen gefundenen Ereignisse sind mit dem erwarteten Untergrund verträglich. Die sich daraus ergebende obere Grenze des Wirkungsquerschnittes liegt weit unter der theoretischen Vorhersage. Obwohl das Resultat negativ ist, stellt es ein schönes Beispiel der engen Wechselwirkung zwischen Experiment und Theorie in der Hochenergiephysik dar. In diesem speziellen Fall bedarf es weiterer theoretischer Anregung.

In einer weiteren Veröffentlichung wurde die exklusive diffraktive Photoproduktion des $\psi(2S)$ -Mesons studiert. Bei dem $\psi(2S)$ -Meson handelt es sich um den ersten radial angeregten Zustand des bekannteren J/ψ -Mesons, dessen diffraktive Erzeugung in mehreren früheren Arbeiten studiert wurde. Das $\psi(2S)$ -Meson wurde sowohl in den direkten Zerfällen in ein e^+e^- - oder $\mu^+\mu^-$ -Paar beobachtet, als auch in dem Kaskadenzerfall über zwei geladene Pionen, $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$, wobei das J/ψ -Meson wiederum in e^+e^- oder in $\mu^+\mu^-$ zerfällt. Die Messungen betreffen Wirkungsquerschnitte in Abhängigkeit von $W_{\gamma p}$, der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems und von t , dem quadrierten Impulsübertrag auf das Pro-

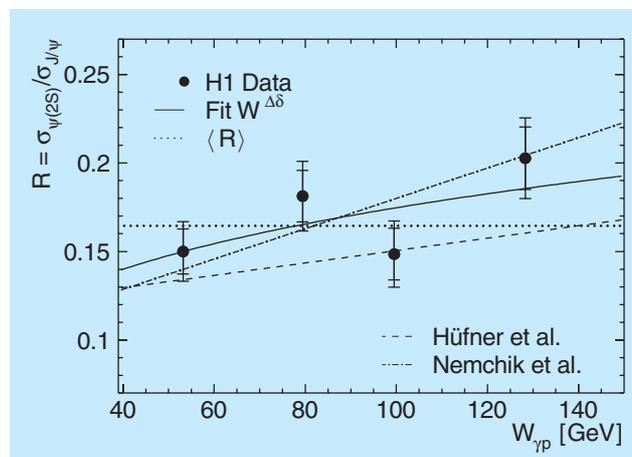


Abbildung 15: Das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für exklusive Erzeugung von $\psi(2S)$ - und J/ψ -Mesonen $R = \sigma_{\psi(2S)}/\sigma_{J/\psi}$ als Funktion der invarianten Photon-Proton-Energie $W_{\gamma p}$. Die durchgezogene Kurve zeigt eine Anpassung der Form $R \propto (W_{\gamma p}/90 \text{ GeV})^{\Delta\delta}$ an die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken), mit $\Delta\delta = 0.24$. Die Größe der Fehler erlaubt es noch nicht, zwischen konstantem Verhältnis (gepunktete Linie) und mit $W_{\gamma p}$ ansteigendem Verhältnis (von der Theorie erwartet, gestrichelte und punkt-gestrichelte Kurven) zu unterscheiden.

ton. Abbildung 15 zeigt das Verhältnis des $\psi(2S)$ -Wirkungsquerschnittes zum entsprechenden Wirkungsquerschnitt für das J/ψ -Meson als Funktion von $W_{\gamma p}$. Im Durchschnitt ist dieses Verhältnis etwa 17% (gepunktete Linie in Abbildung 15).

Die Präzision der Daten erlaubt es gegenwärtig nicht, zu sagen, ob die $\psi(2S)$ - und J/ψ -Erzeugung die gleiche $W_{\gamma p}$ -Abhängigkeit haben oder ob die $\psi(2S)$ -Erzeugung mit der Energie etwas steiler ansteigt, wie Rechnungen in mehreren QCD-Modellen erwarten lassen.

Auch die Abhängigkeit von t , parametrisiert als e^{bt} mit b als frei zu bestimmendem Parameter, wurde mit der J/ψ -Erzeugung verglichen. Hier wurde auch zwischen der rein elastischen Erzeugung und der Protondissoziativen Erzeugung unterschieden. Für letztere wird ein flacherer Verlauf mit t beobachtet als im elastischen Fall. Dies deutet darauf hin, dass im Protondissoziativen Fall das $\psi(2S)$ -Meson, und auch das J/ψ -Meson, an einem effektiv kleineren Teil des Protons gestreut wird als im elastischen Fall. Außerdem unter-

stützen die Daten die Erwartungen von Modellrechnungen, dass die elastische wie auch die Proton-dissoziative $\psi(2S)$ -Erzeugung etwas flacher in t verläuft als die J/ψ -Erzeugung. Letzteres kann durch die unterschiedlichen Wellenfunktionen für den Grundzustand und den ersten radial angeregten Zustand erklärt werden.

Physik jenseits des Standardmodells

Die Suche nach Signalen, die über das Standardmodell hinausweisen, wurde im Berichtsjahr weiter verfolgt, wobei jetzt die gesamten HERA I-Daten zur Verfügung standen. Insbesondere wurde die Suche nach Ereignissen mit einem isolierten Lepton (Elektron, Positron oder Myon) und fehlendem Transversalimpuls fortgesetzt. Solche spektakulären Ereignisse wurden schon in früheren HERA-Daten beobachtet. Eine Erklärung wäre die Erzeugung von W^\pm -Bosonen, die in ein geladenes Lepton und Neutrino zerfallen, wobei das Neutrino den fehlenden Transversalimpuls bewirkt. Allerdings weichen sowohl die beobachtete Rate dieser Ereignisse als auch deren kinematische Eigenschaften von den auf dem Standardmodell beruhenden Erwartungen ab.

Die Suche wurde so optimiert, dass bevorzugt Ereignisse selektiert wurden, die mit W^\pm -Erzeugung verträglich sind. In den Elektron-Proton-Daten wurde ein einziges Ereignis gefunden, in Übereinstimmung mit der Erwartung aus dem Standardmodell. In den Positron-Proton-Daten wurden insgesamt 18 solcher Ereignisse gefunden, gegenüber einer Erwartung von 12.4 ± 1.7 Ereignissen. Dies ist innerhalb der statistischen Unsicherheit in grober Übereinstimmung. Betrachtet man jedoch die Ereignisse bei sehr hohem Transversalimpuls des beobachteten hadronischen Endzustandes, dann stehen 10 Ereignisse einer Erwartung von nur 2.9 ± 0.5 gegenüber. Der Überschuss an Daten gegenüber der Erwartung nach dem Standardmodell ist in Abbildung 16 deutlich zu sehen. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen statistischen Fluktuation ist nur 0.15 %.

Motiviert durch diese Ergebnisse wurde die Suche nach W -Bosonen auch auf hadronische Zerfälle des W -Bosons erweitert. Solche Ereignisse sind durch zwei hochenergetische Teilchen-Jets charakterisiert, die innerhalb der Messgenauigkeit eine mit der W -Masse verträgliche invariante Masse bilden. Solche Ereignisse wurden zwar gefunden, jedoch ist der Untergrund

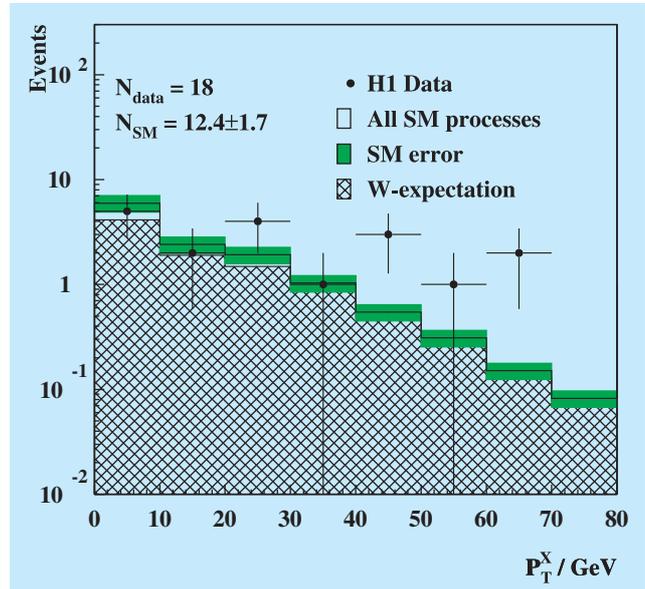


Abbildung 16: Verteilung des hadronischen Transversalimpulses P_T^X in Ereignissen mit isolierten Elektronen, Positronen oder Myonen und fehlendem Transversalimpuls. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) zeigen im Vergleich mit der Erwartung aus dem Standardmodell (Histogramm mit Fehlerband) einen Überschuss bei hohen Werten von P_T^X . Nach dem Standardmodell wird vor allem die Erzeugung von W -Bosonen erwartet (schraffiertes Histogramm).

durch normale Zwei-Jet-Ereignisse zu groß, um weitere Schlüsse zu ziehen.

Spekulationen über eine Erklärung der beobachteten Ereignisse mit Leptonen beinhalten zum Beispiel

- dass die Häufigkeit und Charakteristik der W^\pm -Erzeugung durch einen Prozess verändert wird, der noch nicht in den vorliegenden Rechnungen im Rahmen des Standardmodells berücksichtigt ist,
- oder dass schwere Teilchen produziert werden, die in ein W -Boson und einen hadronischen Jet zerfallen. Dies könnte zum Beispiel ein Top-Quark oder ein supersymmetrisches Teilchen sein.

Mehr Daten sind nötig, um hier mit weiteren Analysen Klarheit zu gewinnen.

Eine fundamentale Frage im Standardmodell ist, warum es drei Generationen von Fermionen gibt und was deren

Massen bestimmt. Eine Antwort wäre das Vorhandensein von Subkonstituenten (Preonen) in den Fermionen, zusammengehalten durch eine neue Kraft. Wenn es eine solche Substruktur der Materie gäbe, dann wäre eine natürliche Konsequenz hieraus die Existenz von angeregten Zuständen der bekannten Leptonen und Quarks. Solche angeregten Zustände der Fermionen aus der ersten Generation könnten bei HERA erzeugt werden, wenn deren Masse im kinematisch zugänglichen Bereich liegt und die entsprechenden Kopplungen an die bekannten Teilchen genügend groß sind.

Im Berichtsjahr wurde, basierend auf den gesamten Daten von HERA I, eine Suche nach angeregten Elektronen e^* veröffentlicht. Die Suche erstreckte sich auf verschiedene Zerfallsmodi des angeregten Elektrons, $e^* \rightarrow e\gamma$, $e^* \rightarrow eZ$ und $e^* \rightarrow \nu W$, die alle im H1-Detektor sehr typische Signaturen haben würden. So wurde nach Ereignissen gesucht, die zwei hochenergetische elektromagnetische Cluster (e, γ) im Kalorimeter aufweisen, oder einen elektromagnetischen Cluster (e) zusammen mit zwei hochenergetischen hadronischen Jets ($Z \rightarrow q\bar{q}$), oder zwei hochenergetische hadronische Jets ($W \rightarrow q\bar{q}$) in Koinzidenz mit hohem fehlenden Transversalimpuls (ν). Es wurden keine solchen Ereignisse gefunden, so dass nur obere Grenzen für deren Produktionsraten bestimmt werden konnten. Diese Grenzen sind abhängig von der Masse des angeregten Elektrons, von dessen Kopplungsstärken f und f' an die Eichbosonen des Standardmodells sowie von der Energieskala Λ der angenommenen Substruktur. Die Kopplungsstärken f und f' beziehen sich hier auf die beiden Symmetriegruppen $U(1)$ und $SU(2)$ der elek-

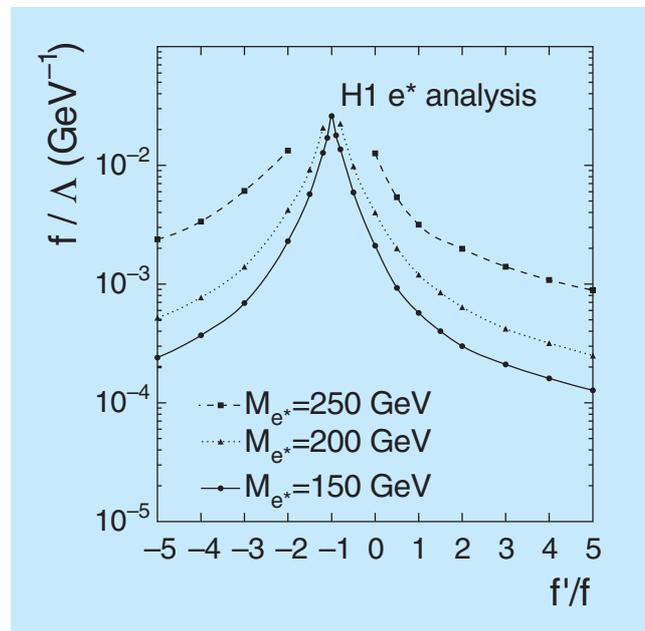


Abbildung 17: *Resultat der Suche nach angeregten Elektronen e^* : dargestellt sind Grenzen für die maximal mögliche Stärke f/Λ der Erzeugung von e^* als Funktion des Verhältnisses f'/f der Eichkopplungen für drei verschiedene Werte der Masse M_{e^*} des angeregten Elektrons.*

trochwachen Wechselwirkung. Abbildung 17 zeigt die Obergrenzen für f/Λ als Funktion des Verhältnisses f'/f für verschiedene Massen des angeregten Elektrons. Die neuen Grenzen sind wesentlich sensitiver als frühere und wurden erstmalig in Abhängigkeit vom Verhältnis f'/f bestimmt.