

Abbildung 3: Das neue H1 Vorwärts-Proton-Spektrometer (VFPS) nach dem Einbau in den HERA-Tunnel. Die beiden „Roman Pot“-Stationen befinden sich in einer Entfernung von mehr als 200 m vom H1-Detektor und dienen dem Nachweis von gestreuten Protonen in einem bisher nicht erschlossenen kinematischen Bereich. Für den Einbau zwischen zwei supraleitenden Ablenkmagneten des Protonstrahls wurde die Flüssig-Helium-Kälteversorgung der Magnete unterbrochen und in einem „Bypass“ am Spektrometaraufbau vorbeigeführt. Im Herbst 2003 wurden mit dem VFPS erste Daten genommen.

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, 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, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: M. Klein, DESY

Im Jahr 2003 wurden die den Betrieb behindernden Strahluntergrundprobleme weiterhin ausführlich studiert und schließlich soweit verringert, dass die HERA Strahlströme nicht mehr durch zu hohen Untergrund begrenzt sind. Diesem Zweck diene eine längere Unterbrechung des HERA-Betriebes im Frühjahr des vergangenen Jahres, in deren Verlauf eine Reihe von Modifikationen der Absorber, Pumpen, Abschirmung und Strahlkontrollsysteme in der Umgebung der *ep*-Wechselwirkungsregion vorgenommen wurden.

Anfang des Jahres 2003 wurde eine Polarisation des Positronstrahls von etwa 50% im *ep*-Luminositätsbetrieb erreicht. Dadurch eröffnen sich für den H1-Detektor neue Möglichkeiten für genaue Messungen zur schwachen Wechselwirkung und für die Entdeckung neuer Phänomene. Der Luminositätsbetrieb wurde im Herbst wieder aufgenommen und führte zu einer kontinuierlichen Erhöhung der Luminosität sowie einer Verbesserung der Effizienz der Datennahme mit dem H1-Detektor.

Zu Beginn des Jahres 2004 konnten tägliche Luminositäten von nahezu 600 nb^{-1} erreicht werden, was von entscheidender Bedeutung für den Betrieb von HERA und H1 in der nun beginnenden HERA-II Phase ist, deren vorrangiges Ziel hohe integrierte

Luminosität mit polarisierten Elektronen und Positronen ist. Erstmals nahm das H1-Experiment Daten zum Jahreswechsel, um die Unterbrechung des Beschleunigerbetriebs kurz zu halten.

Mit dem Einbau des VFPS (Very Forward Spectrometer, Abb. 3), und mit der Verbesserung und Erneuerung wichtiger Detektorkomponenten wie der inneren Proportionalkammer CIP, wurden wichtige Erweiterungen der Apparatur durchgeführt.

Die Kollaboration reichte 54 wissenschaftliche Arbeiten bei der Europäischen Konferenz für Elementarteilchenphysik (EPS03) in Aachen ein, von denen 8 im Berichtsjahr publiziert worden sind und im Folgenden näher beschrieben werden. Damit hat die Kollaboration ihre Analyse der Protonstruktur sowie der Quantenchromodynamik (QCD) fortgesetzt. Die Aufnahme weiterer Institute aus Mexiko, Bulgarien und Montenegro wurde beschlossen bzw. steht bevor.

Etwa 170 Physiker aus 43 internationalen Instituten machten den Vorschlag, nach Beendigung des HERA-II Programms mit einem leicht modifizierten H1-Detektor die Neutronstruktur und weitere fundamentale Fragen der QCD bei HERA zu untersuchen. Dies würde den Betrieb von HERA mit Deuteronen sowie optional mit leichten Kernen und polarisierten Strahlen erfordern.

Der H1-Detektor

Die insgesamt von HERA für H1 zur Verfügung gestellte Luminosität betrug im Jahr 2003 ca. 12.5 pb^{-1} , von denen H1 etwa 5.5 pb^{-1} für Physikanalysen verwenden kann. Auch in diesem Jahr waren die Strahlströme noch durch den zu hohen Untergrund in den empfindlichen Spurdetektoren begrenzt. Mehrere strahlinduzierte Lecks im Strahlrohr in der Nähe der H1 Wechselwirkungszone führten zu einer Verzögerung der Konditionierung des Vakuumsystems. Der Strahlbetrieb wurde Anfang März für 18 Wochen unterbrochen, um eine Reihe von Modifikationen am Detektor und in der Nähe der Wechselwirkungszone durchzuführen, die sich gliedern lassen in:

- Maßnahmen zur Reduktion des Untergrunds,
- Reparaturen von Komponenten,
- Neuinstallation von Detektoren.

Untergrundreduktion

In enger Zusammenarbeit mit Experten von HERA und der anderen Experimente wurden im Rahmen eines auch mit externen Gutachtern besetzten Komitees eine genaue Analyse der Untergrundsituation durchgeführt und Verbesserungsmaßnahmen festgelegt.

Da der größte Beitrag zum Untergrund von Proton-Gas-Wechselwirkungen in Entfernungen bis zu ca. 10 m vom Detektor entsteht, zielten die getroffenen Maßnahmen hauptsächlich darauf, die Vakuumsituation in diesem Bereich zu verbessern. Die Dicke der Synchrotronstrahlungsmaske im Strahlrohr unterhalb des SpaCal-Kalorimeters im rückwärtigen Detektorbereich wurde reduziert, um die Streuwahrscheinlichkeit zu verringern. Ferner wurde die Form modifiziert, um die Erhitzung durch Hochfrequenzverluste des Positronstrahls bei der Injektion zu verringern, die Hauptursache für eine Verschlechterung des Vakuums während des Strahlbetriebes. Gleichzeitig gelang es, sowohl eine effiziente Wasserkühlung der Maske als auch eine zusätzliche Ionengetterpumpe an dieser kritischen Stelle zu integrieren. Darüber hinaus wurden auch die Pumpleistung unmittelbar vor dem Experiment etwa verdoppelt und gleichzeitig zwei hochsensitive Analysegeräte angeschlossen, um die genaue Zusammensetzung des

Restgases auch während des Strahlbetriebes messen zu können. Diese Maßnahmen haben sich als wirksam erwiesen.

Reparaturen

Ein Teil der Siliziumdetektoren von H1 erhielt als Folge des hohen Untergrunds im Jahr 2002 Strahlendosen von bis zu 30 kGy, was zu Schäden an der Frontend-Elektronik sowie an Komponenten der Versorgungselektronik führte. Sowohl der zentrale (CST) als auch der rückwärtige (BST) Siliziumdetektor mussten daher ausgebaut und repariert werden. Für den darüber hinaus geplanten Ersatz von 72 der r-Detektoren im BST durch rauschärmere φ -Detektoren konnten innerhalb von zwei Wochen ca. 70 000 Drähte bei DESY gebondet werden. Beim Wiedereinbau der Siliziumdetektoren wurde eine zusätzliche Bleiabschirmung so um das Strahlrohr angebracht, dass die empfindliche Elektronik besser geschützt wird, ohne dass die Akzeptanz für Physikereignisse beeinträchtigt wird.

Eines der Hauptziele der Betriebsunterbrechung war es, die durch zu hohe Wärmeentwicklung beschädigte Frontend-Elektronik der neuen inneren Proportional-kammer CIP zu ersetzen. Des Weiteren wurde Platz für eine zweite Kühlleitung gefunden, so dass jetzt eine höhere Betriebssicherheit besteht. Mit Hilfe der reparierten CIP-Elektronik können Untergrundereignisse nun schon auf der ersten Stufe des H1-Triggers mit hoher Effizienz erkannt und verworfen werden, was für eine effiziente Datennahme von großer Bedeutung ist.

Die neue, vor dem rückwärtigen Kalorimeter SpaCal installierte Proportional-kammer BPC wurde ebenfalls ausgebaut und ein vorhandenes Gasleck geschlossen, so dass der Detektor anschließend mit hoher Effizienz betrieben werden konnte.

Neuinstallationen

Neben den Reparaturen am H1-Detektor wurden wie geplant neue Komponenten im HERA-Tunnel installiert. Abbildung 3 zeigt den HERA-Tunnel in einer Entfernung von etwa 220 m vom H1-Detektor in Protonstrahlrichtung. Im Hintergrund erkennt man den Helium-Bypass, in dem die Versorgungsleitungen für

die supraleitenden Protonmagnete an den beiden im Vordergrund sichtbaren „Roman Pot“-Stationen des Very Forward Proton Spectrometers (VFPS) vorbeigeführt werden. Im Strahlbetrieb werden die in der Abbildung nicht sichtbaren, im Vakuum befindlichen Lichtfaserdetektoren bis auf wenige Millimeter an den Protonstrahl herangefahren. Hierdurch lassen sich die Trajektorien von Protonen genau vermessen, die bei einer diffraktiven ep-Wechselwirkung mit sehr kleinen Streuwinkeln den zentralen H1-Detektor im Strahlrohr verlassen. Erste Testmessungen mit diesem Detektor, der einen ganz neuen kinematischen Bereich eröffnet, sind vielversprechend. Des Weiteren wurde die Betriebspause genutzt, um die optische Kavität für das neue präzise Polarimeter (LPOL) im HERA-Tunnel Ost-Rechts einzubauen. Durch Streuung der an dieser Stelle longitudinal polarisierten Elektronen an den zirkular polarisierten Photonen eines intensiven Laserstrahls, der zwischen die zwei Spiegel der Kavität eingeschossen wird, kann der Grad der Polarisation in jedem einzelnen Strahl-Bunch gemessen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich der H1-Detektor nach erfolgreicher Beendigung aller Arbeiten während der Unterbrechung des HERA-Betriebes in einem sehr guten Zustand befindet. Da viele der durchgeführten Arbeiten eine Belüftung des Strahlrohres erforderlich machten, wurde HERA zunächst nur mit Positronen bei 12 GeV betrieben, um möglichst rasch wieder akzeptable Vakuumbedingungen herzustellen, bevor der Luminositätsbetrieb wieder aufgenommen wurde. Der in den Jahren 2002/03 so störende, hohe strahlinduzierte Untergrund nahm im Herbst 2003 nahezu stetig ab und erreichte Anfang 2004 ein akzeptables Niveau.

Physikalische Ergebnisse

Die Auswertung der Messdaten von HERA-I wurde fortgesetzt. Im Folgenden werden wichtige, im Berichtsjahr abgeschlossene Analysen etwas näher erläutert.

Messungen bei hohem Q^2

HERA ist die weltweit bedeutendste Anlage zur Untersuchung der Struktur des Protons. In den Jahren 1994-

2000 wurden mit dem H1 Experiment bei Schwerpunktsenergien \sqrt{s} von 300 GeV und 319 GeV Daten mit hoher Qualität aufgezeichnet. Die hohen Energien wurden mit Positron- bzw. Elektronstrahlen von 27.6 GeV Energie sowie mit diesen kollidierenden Protonstrahlen von bis zu 920 GeV Energie erreicht. Damit konnten die Wirkungsquerschnitte von neutralen und geladenen Stromwechselwirkungen, d. h. der Reaktionen $ep \rightarrow eX$ bzw. $ep \rightarrow \nu X$, mit bis dahin unerreichter Genauigkeit gemessen werden. Die hohe Schwerpunktsenergie erlaubt die Untersuchung von Reaktionen bei großen Überträgen des Viererimpulses zum Quadrat vom Elektron auf das Proton bis zu Q^2 -Werten von 30 000 GeV².

Der neutrale Strom (NC) wird durch den Austausch eines virtuellen Photons oder des Z-Bosons der schwachen Wechselwirkung vermittelt. Im Bereich so hoher Q^2 trägt der Z-Austausch bereits merklich zur Reaktionswahrscheinlichkeit bei. Der geladene Strom (CC) wird für Elektronen durch das W^- -Boson und für Positronen durch das W^+ -Boson vermittelt. Wie theoretisch erwartet sind die Reaktionswahrscheinlichkeiten für den Photon-, den Z- und den W-Austausch ab $Q^2 \simeq 10\,000\text{ GeV}^2$ etwa gleich groß, was ein Ausdruck der Vereinigung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkungen ist. Die Bestätigung dieser Erwartung (Abb. 4) kann man als einen Meilenstein in der Physik der elektroschwachen Wechselwirkung bezeichnen.

Gemeinsam mit bereits publizierten ep-Daten bei geringeren Impulsüberträgen, $1 < Q^2 < 200\text{ GeV}^2$, erlauben die nun vorliegenden NC- und CC-Daten eine bisher einmalige Analyse der Partonstruktur des Protons durchzuführen, die, abgesehen von wenigen plausiblen Annahmen, vollständig ist und allein auf den H1-Messdaten beruht. Im Quark-Parton-Modell (QPM) hat das Proton eine Substruktur, die durch Valenzquarks und Seequarks gekennzeichnet ist. Die up- und down-Valenzquarks haben einen hohen Anteil x am Protonimpuls, während die Seequarks eher kleine x haben. Das bedeutet, dass die Valenzquarkdichte bei etwa $x \simeq 0.2$ maximal ist, während die Dichte der Seequarks zu kleinen x hin ansteigt. In der Feldtheorie der starken Wechselwirkung, der Quanten-Chromodynamik (QCD), kann man zwar die Evolution der Querschnitte, bzw. der diese bestimmenden Strukturfunktionen, mit Q^2 präzise vorhersagen, die Dichten der Quarks und der Gluonen im Proton jedoch bisher nicht berechnen. Es ist

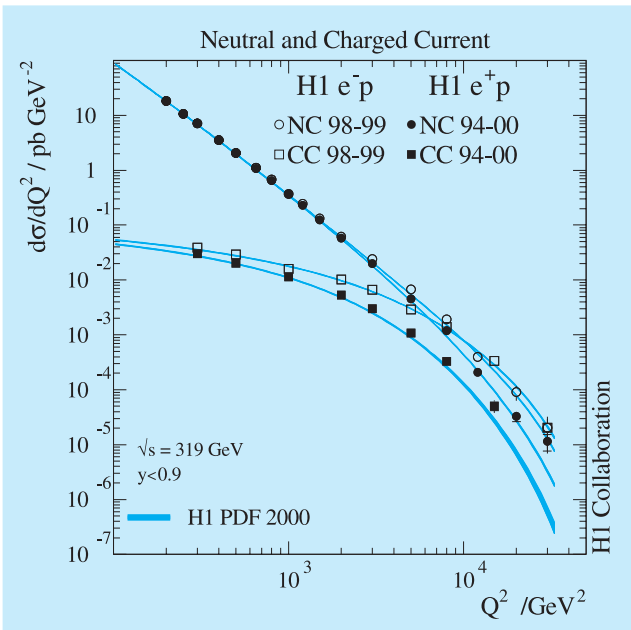


Abbildung 4: Q^2 -Abhängigkeit der inklusiven Streuquerschnitte des geladenen (CC) und des neutralen (NC) Stroms für Elektron- und Positron-Proton-Streuung durch das H1-Experiment. Die Daten (Symbole mit Fehlerbalken) werden durch die theoretischen Rechnungen im Standardmodell der elektroschwachen sowie der starken Wechselwirkungen, unter Zuhilfenahme der durch das H1-Experiment bestimmten Partondichten, gut beschrieben. Die Daten bestätigen die theoretische Vorhersage, dass bei $\sim 10\,000 \text{ GeV}^2$ die CC- und NC-Streuquerschnitte etwa gleich groß sind. Die Breite der Bänder ist ein Maß für die Unsicherheit der theoretischen Rechnungen.

eine herausragende Aufgabe des ep-Streuxperiments H1, diese Dichten akkurat zu messen, da sie nicht nur Aufschluss über die Protonsubstruktur geben, sondern wegen ihrer Universalität ein ganzes Feld von Elementarteilchenwechselwirkungen zu beschreiben erlauben und darüber hinaus Auskunft geben über die noch nicht aufgedeckten Geheimnisse der Dynamik der starken Wechselwirkung, insbesondere im Bereich hoher Partondichten bei kleinen x .

Abbildung 5 zeigt eine Bestimmung der Summen U und D der up- und down-Quarks sowie der entsprechenden Antiquarks, die allein auf den H1-Daten be-

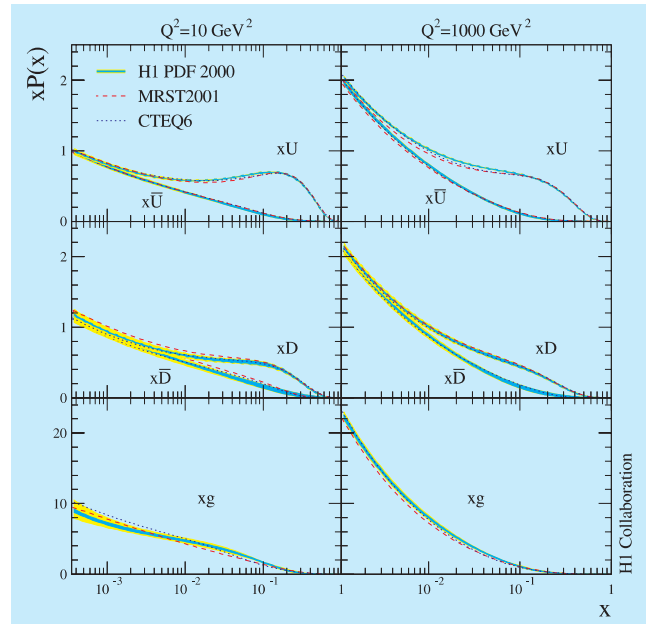


Abbildung 5: Quarkverteilungen xU und $x\bar{U}$, xD und $x\bar{D}$ sowie Gluonverteilung xg , wie sie aus den H1-Daten in nächstführender Ordnung der QCD bestimmt wurden (H1 PDF 2000). Der Vergleich der linken mit den rechten Abbildungen verdeutlicht den großen Einfluss der Q^2 -Evolution, die die QCD erfolgreich voraussagt. Die Ergebnisse stimmen mit kürzlich erfolgten Analysen aller verfügbaren Daten von verschiedenen Experimenten durch die MRST- sowie die CTEQ-Kollaboration gut überein.

ruht. Die Valenzquarkverteilungen ergeben sich in dem neuartigen Ansatz aus den Differenzen $u_v = U - \bar{U}$ und $d_v = D - \bar{D}$. Die Ergebnisse der H1-Analyse stimmen gut mit den Ergebnissen der MRST- und CTEQ-Gruppe überein. Dabei ist bemerkenswert, dass die H1-Daten allein zu einem konsistenten Resultat führen, wie es die MRST- und die CTEQ-Gruppen aus Analysen eines viel umfangreicheren Datensatzes ableiten. Es wird eine Aufgabe zukünftiger Messungen und Analysen sein, die Präzision der Bestimmung der Quark- und der Gluonimpulsdichten weiter zu verbessern, insbesondere in den in dieser Darstellung nicht betonten Bereichen kleiner $Q^2 \simeq 5 \text{ GeV}^2$ sowie großer $x > 0.3$.

Die Messungen des neutralen Stroms bei sehr hohen Impulsüberträgen Q^2 sind sensitiv auf die Existenz neuartiger Wechselwirkungen, die mit dem Austausch bisher nicht nachgewiesener, schwerer Teilchen zusammenhängen könnten. Der NC-Streuquerschnitt könnte daher neben den bekannten Beiträgen von Photon- und Z-Austausch weitere Beiträge von diesen Wechselwirkungen erhalten, deren Amplitude der bekannten Strom-Strom-Wechselwirkung ähnlich und mit einer neuen Kopplung unbekannter Größe, η_{ab} , verbunden ist. In konventionellen Modellen wird die Kopplung η durch die Relation $\eta_{ab} \propto \epsilon_{ab}/\Lambda^2$ charakterisiert, wobei die Indizes a, b die chirale Struktur der unbekanntenen Wechselwirkung mit der Energieskala Λ bezeichnen und ϵ die positive oder negative Interferenz relativ zum Standardmodell angibt. Hierbei wird angenommen, dass die neuen Teilchen so schwer sind, $M^2 \gg Q^2$, dass ihre Reichweite vernachlässigbar ist, weswegen man von einer „Kontaktwechselwirkung“ spricht. Die gesamten HERA-I Daten der H1-Kollaboration wurden benutzt, um nach solchen Wechselwirkungen zu suchen. Das numerische Resultat sind Minimalwerte der Energieskala Λ , die von der Art der betrachteten chiralen Struktur abhängen und im Bereich von einigen 1000 GeV liegen (Abb. 6).

Die vorliegenden Daten konnten mit weiteren, interessanten theoretischen Hypothesen konfrontiert werden, so mit der von der Existenz gebundener Leptoquarkzustände oder mit der neuen Theorie der „Extra Dimensions“, die sich durch Abweichungen von Newtons Gravitationsgesetz im Submikron-Bereich äußern würden. Ein weiteres Resultat dieser Analyse ist der Nachweis, dass Quarks bis hinunter zu Abmessungen, die einem 1/1000 des Protonradius (10^{-18} m) entsprechen, punktförmig sind.

Jets und QCD

In der theoretischen Beschreibung der Kollisionen zwischen Positronen und Protonen bei HERA ist oft das Modell des folgenden mehrstufigen Prozesses zweckmäßig:

- Das Positron emittiert im Kraftfeld des Protons ein Photon und wird dabei gestreut.
- Das Photon fluktuiert, gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation, für kurze Zeit in ein Quark-

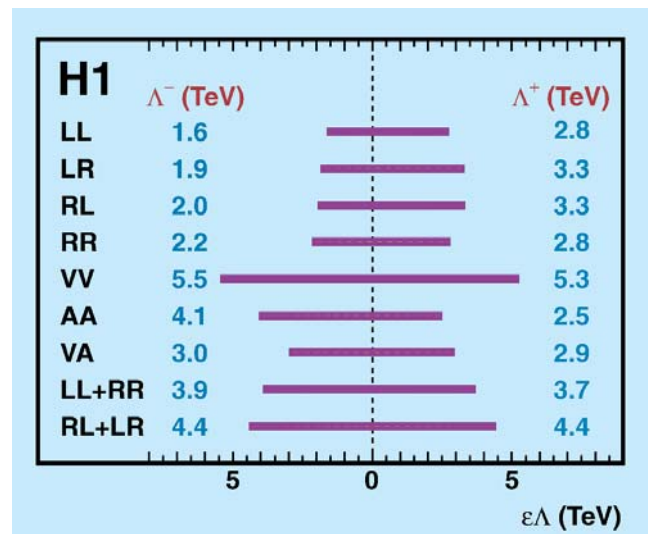


Abbildung 6: Die durch NC-Daten mit 95% Wahrscheinlichkeit ausgeschlossenen Bereiche des Skalensparameters Λ für unterschiedliche Kopplungsstrukturen einer angenommenen Kontaktwechselwirkung, gezeigt jeweils für den Fall konstruktiver (Λ^+) und destruktiver (Λ^-) Interferenz.

Antiquark-Paar. Die Quarks strahlen Gluonen ab, die wiederum in andere Quark-Antiquark-Paare fluktuieren. Das Photon erwirbt so für kurze Zeit eine hadronische Struktur von Quarks und Gluonen (zusammenfassend Partonen genannt).

- Beim Zusammenstoß der Partonen im Photon mit denen des Protons werden die kollidierenden Partonen gelegentlich mit hohem Impulsübertrag gestreut. Diese hochenergetischen Partonen sind zunächst noch durch die Farbkraft mit den anderen Partonen verbunden. Entlang der Verbindung werden aus dem Vakuum neue Quark- oder Gluon-Paare gebildet, die wiederum in neue Parton-Paare fluktuieren. Das Resultat sind Teilchen-Kaskaden, so genannte Jets, die in Richtung und Energie die ursprünglich kollidierenden Partonen repräsentieren.

Die QCD beschreibt die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen. Dass die Photon-Struktur in der Wechselwirkung von virtuellen Photonen mit dem Proton eine wichtige Rolle spielt, wurde bei HERA in früheren Analysen nachgewiesen. Dabei kann das Photon entweder als Ganzes oder nur mit einem Bruchteil seiner Energie an den Parton-Kollisionen teilnehmen,

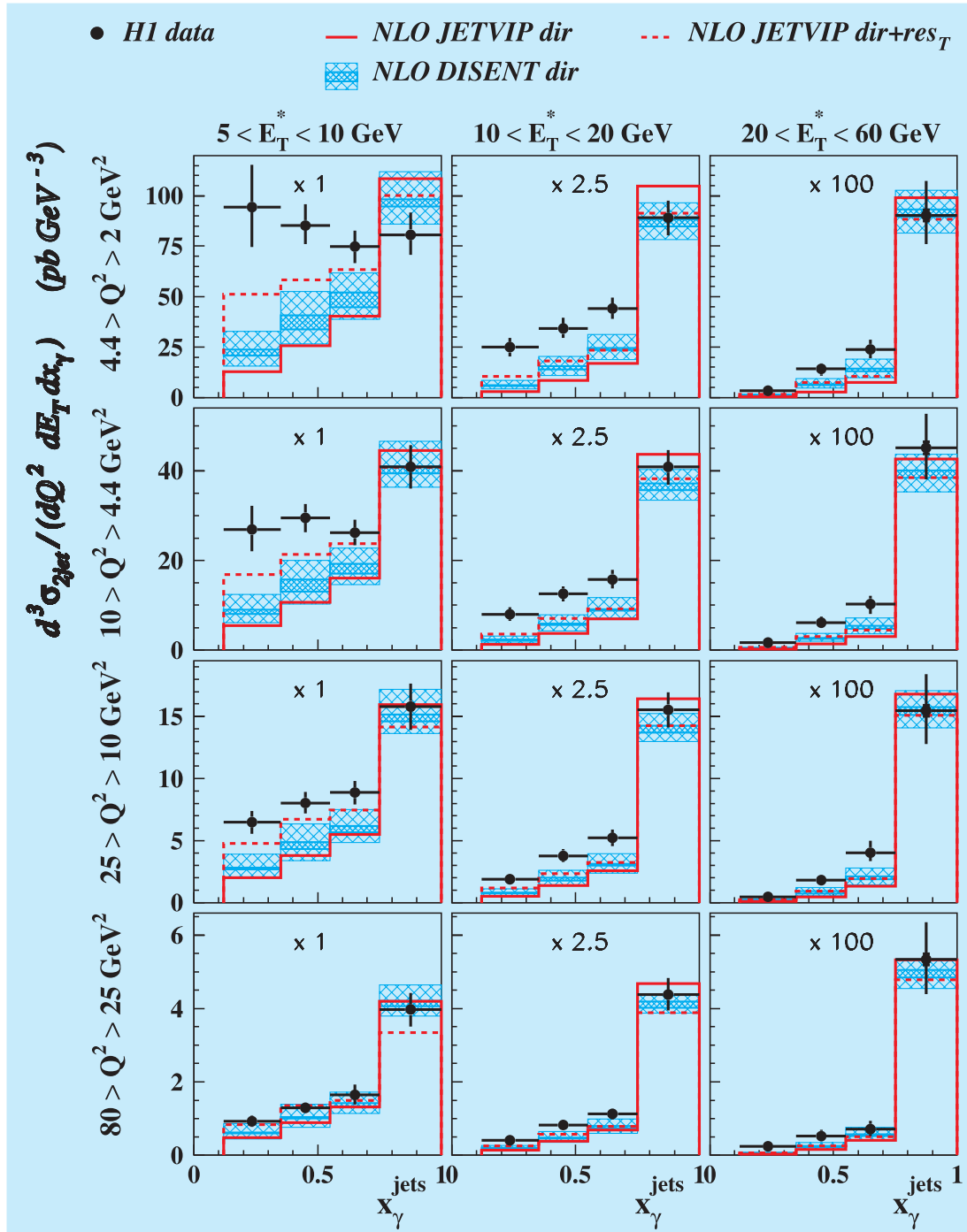


Abbildung 7: Wirkungsquerschnitte für 2-Jet-Produktion als Funktion des relativen Partonimpulses x_γ^{jets} im Photon für drei Bereiche der transversalen Jet-Energie E_T^* und vier Bereiche des quadrierten Impulsübertrages Q^2 . Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen der QCD in nächstführender Ordnung (NLO). Die schraffierten Bänder zeigen die Unsicherheiten der Modellrechnungen.

was die so genannten direkten von den aufgelösten Photon-Wechselwirkungen unterscheidet. Die Variable x_γ , der Anteil des wechselwirkenden Partons am Photonimpuls, charakterisiert die Wechselwirkung, mit $x_\gamma \sim 1$ für direkte und $x_\gamma \ll 1$ für aufgelöste Kollisionen.

Messungen von Jets können zur Überprüfung der QCD herangezogen werden. In zwei Analysen wurden Ereignisse mit zwei Jets, so genannte Dijet-Ereignisse, ausgewählt, wobei beide Jets mit hoher transversaler Energie im H1 Flüssig-Argon Kalorimeter nachgewiesen wurden. Die Ereignisse wurden bei niedrigen bis mittleren Q^2 gemessen, wobei das gestreute Positron im Rückwärtskalorimeter SpaCal nachgewiesen wurde. Die hohe Statistik der Daten erlaubt die Analyse des Wirkungsquerschnittes als Funktion von mehreren Variablen.

In der ersten Analyse wurden die Dijet-Daten systematisch mit heute verfügbaren QCD-Störungsrechnungen verglichen. Diese sind entweder bis zur zweiten Ordnung (NLO) in α_s , der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung, durchgeführt, oder sie wurden nach der führenden Ordnung abgebrochen (LO). Bei LO-Rechnungen wurde durch modellabhängige Zusatzrechnungen, so genannte Parton-Schauer, der Einfluss höherer Ordnungen nachgebildet.

Beim Vergleich mit den Daten zeigte sich, dass keine der NLO-Rechnungen die Daten vollständig beschreiben kann. Eine bessere Beschreibung wurde mit den LO QCD-Rechnungen mit zusätzlicher Parton-Schauer-Simulation erreicht. Die Daten lassen die Schlussfolgerung zu, dass NLO-Rechnungen nicht ausreichen, sondern noch höhere Ordnungen der Störungsrechnung eingeschlossen werden müssten. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Hier ist der Querschnitt der Dijet-Produktion gegen x_γ aufgetragen, in Intervallen von Q^2 und der transversalen Jet-Energie E_T^* . Die NLO-Rechnungen (DISENT, VIPJET) können die Daten bei niedrigen Werten von x_γ , Q^2 und E_T^* nicht beschreiben. Man sieht auch, dass bei höheren Q^2 und E_T^* die direkte Photon-Wechselwirkung dominiert ($x_\gamma \sim 1$), während bei niedrigeren Werten von Q^2 und E_T^* der Anteil von aufgelösten Photon-Wechselwirkungen ($x_\gamma \lesssim 0.8$) beträchtlich ist. Gerade hier versagen die NLO-Rechnungen. Interessant ist, dass eine gute Beschreibung dieses Teils des kinematischen Bereiches

nur mit Berücksichtigung des longitudinal polarisierten Anteils der Photon-Struktur gelingt. Dies konnte mit diesen Daten zum ersten Mal nachgewiesen werden.

In der zweiten Analyse von Dijet-Ereignissen wurde der Bereich sehr niedriger Werte von x , des Impulsanteils des wechselwirkenden Partons im Proton, untersucht. Die hohe Energie von HERA ermöglicht, dass auch bei sehr kleinen x -Werten die beteiligten Partonen als hochenergetische Jets sichtbar werden. Eine der heiß diskutierten Fragen in der QCD ist die Entwicklung (so genannte Evolution, d. h. Abhängigkeit von Q^2) von Parton-Dichten bei kleinen x -Werten. Wegen der Komplexität der QCD-Rechnungen werden diese mit vereinfachenden Näherungen durchgeführt. Eine gebräuchliche Näherung, die so genannte DGLAP-Entwicklung, die die Daten bei mittleren x -Werten gut beschreibt, vernachlässigt Terme $\sim \ln 1/x$, die bei kleinen x groß werden. Die DGLAP-Näherung sollte demnach bei kleinen x versagen. Dagegen wird erwartet, dass eine alternative Entwicklungsgleichung, BFKL genannt, die gerade Terme $\sim \ln 1/x$ summiert, hier die Daten gut beschreibt. Unterschiede von DGLAP und BFKL werden unter anderem erwartet in der relativen azimuthalen Winkelverteilung von Jets in Dijet-Ereignissen. Während die DGLAP-Näherung voraussagt, dass Jets im hadronischen Ruhesystem hauptsächlich mit maximalem azimuthalen Winkelabstand produziert werden, erwartet man in der BFKL-Theorie einen größeren Anteil von Jets mit kleinerem Winkelabstand. Dies ist ein Resultat der in der BFKL-Theorie modifizierten Erzeugung der Gluonen bei kleinen x -Werten. In den BFKL-Rechnungen hängt die Gluon-Dichte nicht nur, wie im DGLAP-Fall, von x und Q^2 , sondern explizit auch vom Transversalimpuls k_\perp der Gluonen ab und wird daher als „nicht-integrierte Gluon-Dichte“ bezeichnet.

In der Analyse wurde festgestellt, dass NLO QCD-Rechnungen, sowohl in der DGLAP-Näherung als auch mit BFKL durchgeführt, die Dijet-Querschnitte gut beschreiben, auch bei kleinen x -Werten. Dies gilt für den Wirkungsquerschnitt, aufgetragen als Funktion von Q^2 , x und E_T^{jets} , der Transversalenergie der Jets. Um einen Unterschied in den beiden Näherungen deutlicher zu sehen, wurde das Verhältnis S von Dijet-Ereignissen mit Jet-Jet Azimut $< 120^\circ$ zu allen Dijet-Ereignissen als Funktion von x analysiert. Dies ist in Abbildung 8 für mehrere Intervalle von Q^2 dargestellt. Das Verhältnis S

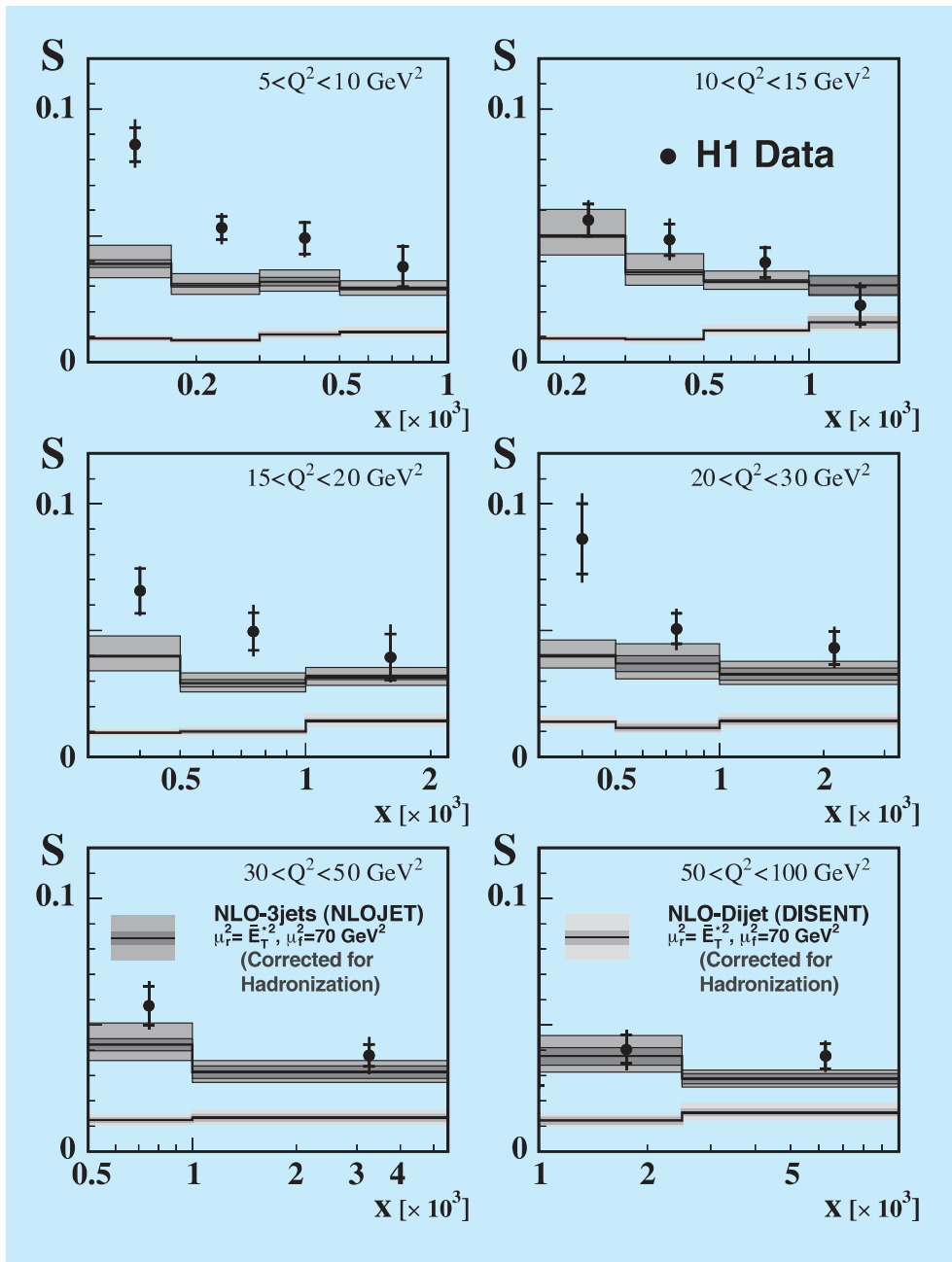


Abbildung 8: Das Verhältnis S von 2-Jet-Ereignissen mit Jet-Jet Azimutwinkel $< 120^\circ$ zu allen 2-Jet-Ereignissen, als Funktion des Anteils x am Protonimpuls in sechs Bereichen des quadrierten Impulsübertrages Q^2 . Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen der QCD in nächstführender Ordnung (NLO), für 2-Jet und 3-Jet-Produktion. Die schraffierten Bänder zeigen die Unsicherheiten der Modellrechnungen.

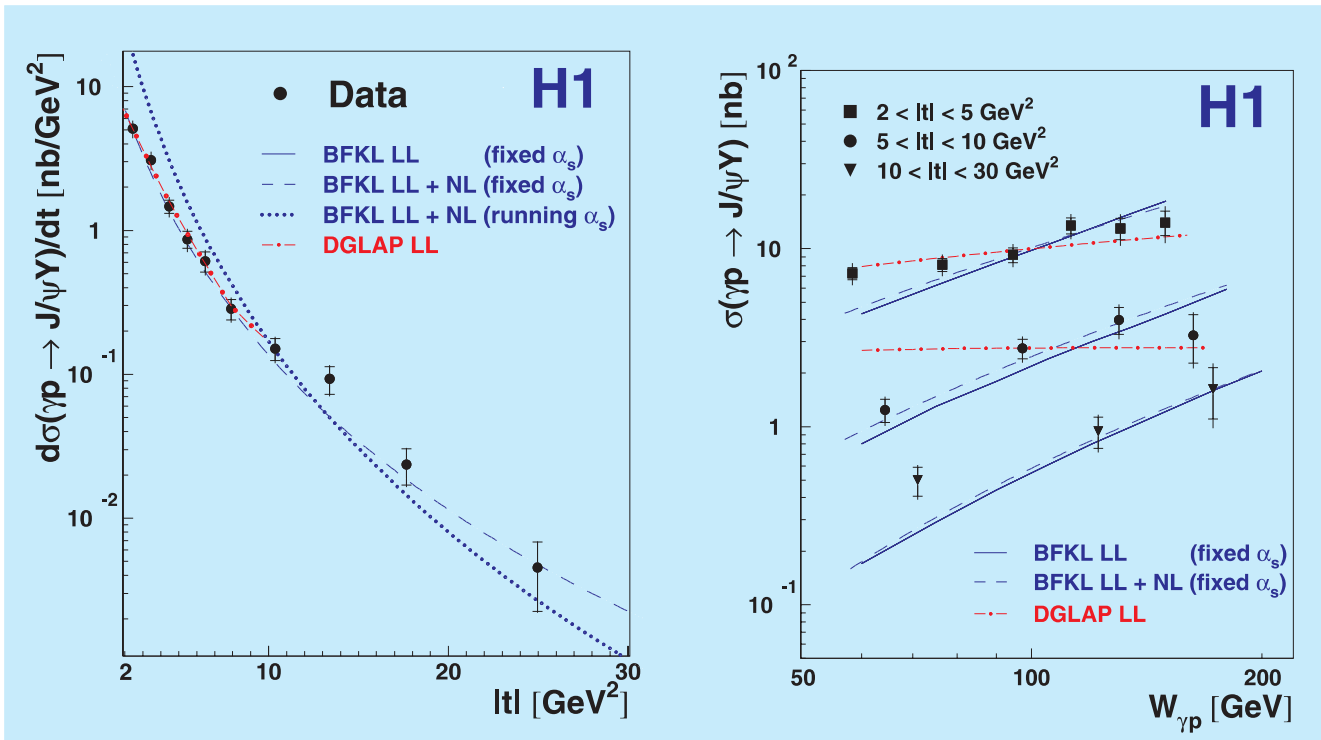


Abbildung 9: Photon-Proton Wirkungsquerschnitt für J/ψ -Photoproduktion, als Funktion des quadrierten Proton-Impulsübertrages $|t|$ (links) und der invarianten Photon-Proton-Energie $W_{\gamma p}$ in drei Bereichen von $|t|$ (rechts). Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen der QCD in führender (LL) und nächst-führender (NL) logarithmischer Ordnung in BFKL- und DGLAP-Näherungen.

beträgt in den Daten etwa 5%, während die DGLAP-Vorhersage bei nur 1% liegt. Eine Rechnung (NLOJET), die die Ausbildung eines dritten Jets mit niedrigerer Energie berücksichtigt, sagt zwar im allgemeinen größere S-Werte voraus, kann aber trotzdem nicht die Daten bei den kleinsten Q^2 -Werten, wo auch die kleinsten x -Werte erreicht werden, gut beschreiben.

In weiteren Studien dieser S-Verteilung konnten zwei verschiedene Modelle der nicht-integrierten Gluon-Dichte geprüft werden, die zwar beide die Proton-Struktur in inklusiver $e p$ -Streuung beschreiben, von denen jedoch nur eines mit der durch die S-Verteilung gegebenen azimuthalen Korrelation zweier Jets konsistent ist.

Die Fragen der BFKL-Entwicklung und der nicht-integrierten Gluon-Dichte wurden auch in einer wei-

teren Analyse betrachtet. Hier wurde die diffraktive Photoproduktion von J/ψ -Mesonen bei hohen Impulsüberträgen am Proton studiert. Bei diffraktiven Prozessen, die etwa 10% des totalen Wirkungsquerschnitts bei HERA ausmachen, geht das Proton praktisch unversehrt aus der Kollision mit dem Photon hervor. Demnach werden hier keine einzelnen Partonen aus dem Proton ausgestoßen, was das Proton mittels der Farbkraft zerreißen würde. Stattdessen findet ein farbloser Austausch statt, häufig spricht man von „Pomeron“-Austausch, wobei das Pomeron ein hypothetisches Teilchen mit den Quantenzahlen des Vakuums ist.

Ein farbloser Austausch kann in der QCD in einfacher Form als Austausch von zwei Gluonen dargestellt werden. Diese Gluonen können miteinander wechselwirken, was durch eine Leiter mit Sprossen aus weiteren Gluonen versinnbildlicht werden kann. Bei der diffrak-

tiven Erzeugung von J/ψ -Mesonen findet demnach in der letzten Stufe des beschriebenen mehrstufigen Prozesses eine Wechselwirkung zwischen der Gluonleiter und dem aus einer kurzfristigen Fluktuation des Photons entstandenen charm-Quark-Antiquark Paar statt. Das J/ψ -Meson wird im H1-Detektor über seinen Zerfall in zwei Myonen nachgewiesen.

Dieser Prozess wird bei sehr kleinen Werten von x gemessen. Interessant wird es nun, wenn der Prozess von einem hohen Impulsübertrag t vom Proton auf das Gluon-Paar begleitet wird, da die großen t -Werte als Skala in QCD-Störungsrechnungen dienen können. Solche Rechnungen, unter Verwendung von sowohl DGLAP- als auch BFKL-Evolutionen in den Parton-Dichte-Verteilungen, können dann mit den Daten verglichen werden. Unterschiede bei diesen Rechnungen könnte man, bildlich gesprochen, auf Unterschiede in der Sprossenanordnung der Gluonleiter zurückführen.

In Abbildung 9 ist der gemessene Photon-Proton-Querschnitt der J/ψ -Produktion aufgetragen als Funktion sowohl von t als auch von der Photon-Proton-Schwerpunktsenergie $W_{\gamma p}$ in drei Intervallen von t . Die Daten sind sowohl mit DGLAP- als auch mit BFKL-Rechnungen verglichen, wobei deutliche Unterschiede sichtbar sind. Die BFKL-Rechnungen liefern eine gute Beschreibung der Daten über den ganzen t -Bereich. Die DGLAP-Rechnung dagegen beschreibt die Daten nur im unteren Bereich von t . Es ist bemerkenswert, dass die Reaktion erfolgreich durch eine QCD-Störungsrechnung mit mehrfachem Gluon-austausch beschrieben werden kann. Der Erfolg der BFKL-Rechnungen bei der Datenbeschreibung zeigt, dass die diffraktive, exklusive Produktion von Vektormesonen ein wertvolles Instrument beim Studium von nicht-integrierten Gluon-Dichten ist.

Physik jenseits des Standardmodells

Im Vorjahr wurde bereits über die Beobachtung von Ereignissen mit einem isolierten Lepton (Elektron, Positron oder Myon) und fehlendem Transversalimpuls berichtet. Auch im Berichtsjahr wurde versucht, sich einem Verständnis dieser außergewöhnlichen und überraschend häufig auftretenden Ereignisse aus unterschiedlichen Richtungen zu nähern, indem ähnliche Ereignis-

topologien in den gesamten zur Verfügung stehenden Daten von HERA-I genauer studiert wurden. Ereignisse mit einem isolierten Lepton und fehlendem Transversalimpuls sowie großem hadronischen Transversalimpuls könnten entstehen, wenn bei den $e^\pm p$ Kollisionen top-Quarks (t) über eine Kopplung $\kappa_{t\gamma}$ des abgestrahlten Photons an ein up-Quark (u) im Proton erzeugt würden. Deren Zerfall in ein bottom-Quark (b) und ein W-Boson, das seinerseits leptonic in ein Lepton und das zugehörige Neutrino zerfällt, führt genau zu der beobachteten Signatur. Kinematisch reicht die bei HERA zur Verfügung stehende Schwerpunktsenergie zwar aus, um einzelne t -Quarks zu erzeugen, um jedoch eine nennenswerte Zahl von Ereignissen über diesen Mechanismus zu erhalten, müsste die Kopplung $\kappa_{t\gamma}$ einen anomal hohen Wert haben, da solche neutralen Übergänge, die gleichzeitig die Quark-Flavour ändern (FCNC, Flavour Changing Neutral Currents) im Standardmodell stark unterdrückt sind. Die zum Nachweis von leptonicen t -Zerfällen optimierte Suche ergab 5 Ereigniskandidaten gegenüber einem erwarteten Untergrund von 1.3 Ereignissen, während das Ergebnis einer analogen Suche nach hadronischen t -Zerfällen mit dem in diesem Fall höheren Standardmodell-Untergrund gut verträglich ist. Interpretiert man den gefundenen Überschuss als Signal für t -Produktion, so ergibt sich für den Wirkungsquerschnitt ein Wert von $\sigma = 0.29^{+0.15}_{-0.14}$ pb, der nicht im Widerspruch mit den in anderen Experimenten gefundenen oberen Grenzen ist. Betrachtet man hingegen den Überschuss an Ereignissen als reine statistische Fluktuation, so ergibt sich als obere Grenze für den Wirkungsquerschnitt ein Wert von $\sigma < 0.55$ pb, was einer oberen Grenze für die $t\gamma$ -Kopplung von $|\kappa_{t\gamma}| < 0.27$ entspricht.

Es ist naheliegend zu untersuchen, ob es auch Abweichungen bei der Erzeugung von mehreren Leptonen mit hohem Transversalimpuls gegenüber dem Standardmodell gibt. In einer weiteren Veröffentlichung wurde daher über die Suche nach solchen Ereignissen berichtet. Im Rahmen des Standardmodells werden solche Multi-Lepton-Ereignisse bei HERA überwiegend in Photon-Photon-Wechselwirkungen erzeugt, wobei die Photonen jeweils von den einlaufenden Strahlteilchen abgestrahlt werden. Es wurden Ereignisse mit zwei („ $2e^\pm$ “) und drei („ $3e^\pm$ “) Elektronen (bzw. Positronen) gefunden und daraus differentielle Wirkungsquerschnitte bestimmt. Während die Verteilung kinematischer Größen im Allgemeinen gut mit den Erwartungen überein-

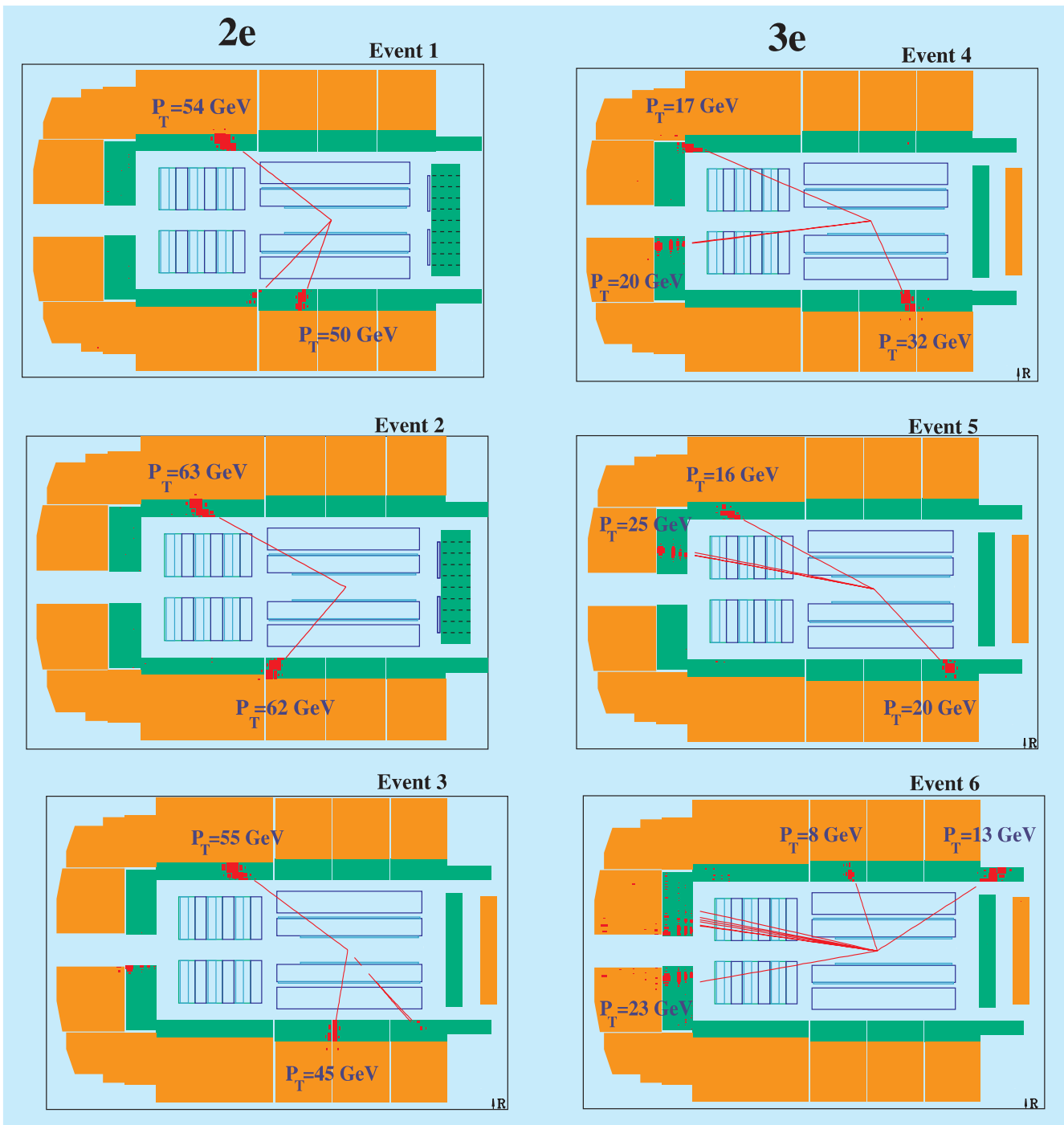


Abbildung 10: Die im H1-Detektor nachgewiesenen drei „2e“- (links) und drei „3e“-Ereignisse (rechts) mit $M_{12} > 100$ GeV in der Seitenansicht. In den „3e“-Ereignissen wurde die invariante Masse M_{12} für die beiden Elektronen mit größtem Transversalimpuls berechnet.

stimmt, gibt es Abweichungen bei der Anzahl von Ereignissen im Bereich invarianter Massen M_{12} oberhalb von 100 GeV, wobei M_{12} für die beiden Elektronen mit größtem Transversalimpuls berechnet wurde. In diesem für die Suche nach bisher unbekanntem Phänomenen interessanten Bereich wurden drei „2e“- und drei „3e“-Ereignisse beobachtet, die in Abbildung 10 dargestellt sind. Im Rahmen des Standardmodells werden demgegenüber nur 0.30 ± 0.04 „2e“- und 0.23 ± 0.04 „3e“-Ereignisse vorhergesagt.

Der beobachtete Überschuss in den Multi-Elektron-Ereignissen legt nahe, die Untersuchungen von Multi-Lepton-Ereignissen auch auf isolierte Myonen auszuweiten. Dies ist Gegenstand einer weiteren Veröffentlichung. Diese Analyse zeigt gute Übereinstimmung mit den Erwartungen des Standardmodells für die Produktion von Myonpaaren mit einer invarianten Masse

oberhalb von 5 GeV. Auch die separat bestimmten Wirkungsquerschnitte für die elastische ($ep \rightarrow e\mu\mu p$) und unelastische ($ep \rightarrow e\mu\mu X$) Myonpaar-Produktion stimmen gut mit den erwarteten Werten überein. Selbst im Bereich hoher invarianter Massen ist die Übereinstimmung gut. Weiterhin wurde untersucht, ob es Ereignisse gibt, die neben dem Myonpaar weitere Leptonen (e oder μ) aufweisen. In der Tat findet man 16 Ereignisse mit einem zusätzlichen Elektron bei einer Erwartung von 14.9 ± 1.6 , hauptsächlich von Photon-Photon-Prozessen. Es wurden keine Ereignisse mit mehr als einem zusätzlichen Elektron oder mit mehr als zwei Myonen gefunden. Eine endgültige Klärung der Frage, ob es sich bei den in den unterschiedlichen Analysen gefundenen Abweichungen vom Standardmodell um statistische Fluktuationen handelt oder ob erste Hinweise auf neue Phänomene vorliegen, kann nur mit zusätzlichen Daten erfolgen.