

Abbildung 24: Die vom H1-Experiment seit 1992 aufgezeichnete und für Physikanalysen verfügbare Luminosität als Funktion der Anzahl der HERA-Betriebstage getrennt für HERA I und HERA II.

# H1-Experiment

**Beteiligte Institute:** RWTH Aachen, Univ. Antwerpen, Vinca Inst. of Nucl. Sci. Belgrad, 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, Slovak Acad. Sci. Košice, Univ. of Lancaster, Univ. of Liverpool, QMWC London, Univ. of Lund, 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, Inst. of Phys. and Techn. Mongolian Acad. of Sci. Ulaanbaatar, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ. Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

**Sprecher:** Claude Vallée, CPPM Marseille, Frankreich

Nach fünfzehn sehr erfolgreichen Betriebsjahren ging die Datennahme mit dem H1-Detektor am 30. Juni 2007 zu Ende. Die Anstrengungen der H1-Kollaboration konzentrierten sich in der ersten Jahreshälfte darauf, den hervorragenden Zustand des gesamten Detektors aufrecht zu erhalten, um die von HERA mit sehr großer Effizienz gelieferte Luminosität bis zum letzten Tag optimal ausnutzen zu können. Der HERA-Betrieb bei der nominellen Protonenergie von 920 GeV wurde Ende März beendet, da in den verbleibenden 3 Monaten Daten bei halber Protonenstrahlenergie genommen werden sollten. Insgesamt steht der H1-Kollaboration damit eine Luminosität von  $480 \text{ pb}^{-1}$  bei Protonenergien von 820 bzw. 920 GeV für Analysen zu Verfügung (siehe Abbildung 24). Die Daten bei reduzierter Protonenergie sollen der ersten direkten Messung der longitudinalen Strukturfunktion  $F_L$  bei HERA dienen und werden damit eine direkte Bestimmung der Gluondichte sowie eine wichtige Überprüfung unseres Verständnisses der Physik bei kleinen Werten der Skalenvariablen  $x$  ermöglichen. Dank sorgfältiger Vorbereitungen, insbesondere von Seiten der Maschinengruppe, erfolgte die Umstellung auf den 460 GeV Betrieb völlig reibungslos, so dass die für

die Messung erforderliche Datenmenge bereits Ende Mai vorhanden war. Aus diesem Grund konnte der letzte Monat sogar dazu verwendet werden, weitere Daten bei einer mittleren Energie von 575 GeV aufzuzeichnen. Insgesamt stehen der H1-Kollaboration für die  $F_L$ -Messung daher  $12.3 \text{ pb}^{-1}$  bei 460 GeV und  $6.5 \text{ pb}^{-1}$  bei 575 GeV zur Verfügung. Vorläufige Ergebnisse von dieser wichtigen Messung werden für das Frühjahr 2008 erwartet.

Im Berichtsjahr hat die H1-Kollaboration 9 Veröffentlichungen auf verschiedenen Arbeitsgebieten eingereicht, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden. Wie in den vergangenen Jahren wurden darüber hinaus wieder zahlreiche Beiträge mit neuen Resultaten zu den wichtigen Konferenzen und Workshops, wie der DIS-Konferenz in München, der EPS-HEP Konferenz in Manchester, sowie der Lepton-Photon Konferenz in Daegu, Korea geschickt. Von den insgesamt 25 neuen, vorläufigen Ergebnissen befassen sich alleine 10 mit der Suche nach seltenen oder exotischen Prozessen, deren endgültige Veröffentlichung in Kürze erfolgen wird. Alle diese Resultate basieren auf den gesamten bei nomineller Proton-Energie genommenen HERA II Daten, wobei der überwiegende Teil von ihnen auch die HERA I Da-

ten miteinschließt und damit eine Datenmenge von fast  $500 \text{ pb}^{-1}$  umfasst. Darüber hinaus wurden zu den Sommerkonferenzen zwei gemeinsam von H1 und ZEUS verfasste Beiträge zur Beobachtung von Ereignissen mit isoliertem Lepton und fehlendem Transversalimpuls, sowie von Ereignissen, die mehrere Elektronen enthalten eingereicht. Beide Kollaborationen haben hierfür jeweils ihre gesamte Datenmenge analysiert, so dass diese gemeinsamen Resultate auf einer kombinierten Datenmenge von fast  $1 \text{ fb}^{-1}$  beruhen. In beiden Fällen stimmen die kombinierten Messungen gut mit den Erwartungen des Standardmodells überein. Zwei weitere vorläufige Ergebnisse, die aus der Kombination der HERA I Resultate von H1 und ZEUS hervorgehen befassen sich mit der Messung des Wirkungsquerschnittes für Ereignisse der tiefinelastische Streuung (DIS) des neutralen Stroms und der Messung der Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung  $\alpha_s$ , die gegenüber einer früheren H1-ZEUS Kombination einen fast halbierten Fehler aufweist und in sehr guter Übereinstimmung mit dem Weltmittelwert ist.

Die Zusammenarbeit zwischen H1 und ZEUS im Bereich gemeinsamer Analysen ist weiter vorangeschritten. Für eine Reihe von Analysesthemen werden die Ergebnisse gemeinsam diskutiert mit dem Ziel, durch eine Kombination der Resultate eine möglichst hohe Genauigkeit für die endgültigen HERA-Messergebnisse zu erzielen.

Eine präzise Bestimmung der Partondichteverteilungen (PDF) aus den gesamten HERA Daten wird insbesondere für die Interpretation der Messergebnisse am LHC von großer Bedeutung sein. Dieser Experimentübergreifende Aspekt der HERA-Physik ist daher ein wesentliches Element des entstehenden Analysezentrum im Rahmen der *Terascale-Allianz* der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF). Auf der anderen Seite ist es auch wichtig herauszufinden, in welchen Bereichen des Phasenraumes Verbesserungen unserer Kenntnis der PDFs von der Analyse der LHC-Daten erwartet werden können. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des HERA-LHC Workshops die neue Arbeitsgruppe *PDF4LHC* gebildet, in der neben H1 und ZEUS auch die LHC Experimente und die Theorie vertreten sind. Die Bedeutung dieses Forschungsbereichs äußert sich auch darin, dass im Berichtsjahr eine neue HGF-Hochschul-Nachwuchsgruppe bewilligt wurde, die von

einer H1-Physikerin geleitet wird und in diesem Themenbereich arbeiten wird.

Für die meisten angestrebten Präzisionsanalysen sind die Güte von Kalibration und Rekonstruktionssoftware bestimmend für die endgültige Qualität des Ergebnisses. Es wurden daher besondere Anstrengungen unternommen, um weitere Verbesserungen in diesen wichtigen Bereichen zu erreichen. Um von dem so verbessertem Detektor-Verständnis profitieren zu können und einen homogenen Datensatz für die Analyse zu Verfügung zu haben, mussten alle HERA II Daten neu rekonstruiert werden. Dank der im Vorjahr vorbereiteten Änderungen in der Computing-Infrastruktur lassen sich die gesamten HERA II Daten in wenigen Wochen vollständig reprozessieren. Auf diese Weise werden auch zukünftige Optimierungen noch zeitnah in die Physikanalysen einfließen können.

Um in der Genauigkeit der physikalischen Ergebnisse nicht durch unzureichende Statistik von simulierten Ereignissen begrenzt zu sein, erfordern die HERA II Analysen auch die Erzeugung einer erheblich größeren Menge von Monte Carlo Ereignissen. Die Rate der für H1 auf dem LCG GRID simulierten Ereignisse wächst beständig und erreichte im Berichtsjahr Werte von fast 100 Millionen Ereignissen pro Monat. Ein weiteres Anwachsen dieser Zahlen wird angestrebt, um den für die beiden kommenden Jahren geschätzten Bedarf von einigen  $10^9$  Monte Carlo Ereignissen decken zu können.

## Der H1-Detektor

Die letzten Betriebsmonate des H1-Experiments waren durch eine besonders hohe Effizienz der Datennahme und eine hervorragende Datenqualität gekennzeichnet.

## Datennahme

Die Datennahme mit Positronen wurde ohne Unterbrechung über den Jahreswechsel weitergeführt. Insgesamt wurden in der letzten  $e^+p$  Datennahmepériode bei 920 GeV eine Luminosität von  $135.6 \text{ pb}^{-1}$  aufgenommen, von der  $51.5 \text{ pb}^{-1}$  in den ersten drei Monaten

von 2007 aufgezeichnet wurden. Die Gesamteffizienz der Datennahme konnte während des sich anschließenden Betriebs bei reduzierter Protonenergie noch weiter gesteigert werden und erreichte regelmäßig Werte bis 90%, was nach Korrektur der intrinsischen Totzeit-Verluste, die durch das Design des Frontend-Systems von H1 begründet sind, einer reinen Datennahme-Effizienz von 98% entspricht. Den geänderten Erfordernissen des Betriebs bei reduzierter Protonenergie konnte sehr flexibel durch Änderungen der Triggerstrategie entsprochen werden. Insbesondere kam hier der neue *Spacal-Topologische-Trigger* (STT) zum Einsatz, der topologische Information in den Spurdetektoren CIP und BST sowie dem rückwärtigen Kalorimeter Spacal dazu verwendet, um Untergrund sehr wirkungsvoll zu unterdrücken.

## Detektor-Abbau

Mit Ausnahme des Eisenjochs, der Muonkammern und der supraleitenden Spule, die gemeinsam für einen zukünftigen Teststand erhalten werden sollen, wurde mit dem Abbau aller Detektor-Komponenten samt der zugehörigen Ausleseelektronik unter Beteiligung der externen H1-Institute im Juli begonnen. Ein Teil der Kosten des Abbaus kann dabei durch den Verkauf von freiwerdendem Material rückfinanziert werden. Zunächst wurden die Tunnelsysteme und die rückwärtigen Detektoren des Hauptdetektors ausgebaut, die zu einem großen Teil als Ausstellungsstücke zurück an die entsprechenden Institute transportiert wurden. Die Hauptarbeit besteht jedoch im Rückbau des Flüssig-Argon Kalorimeters. Das Aufwärmen erfolgte planmäßig innerhalb von 30 Tagen und bis Ende 2007 war das Kalorimeter bereits zu ca. 20% zurückgebaut. Es ist geplant die gesamten Abbauarbeiten bis etwa Mitte 2008 abzuschließen.

## Physikerggebnisse

Im Berichtsjahr sind insgesamt 9 Analysen aus den Bereichen Quanten-Chromo-Dynamik, Jet-Physik, Diffraktion und der Suche nach neuer Physik zur Ver-

öffentlichung eingereicht worden. Einige Aspekte dieser Veröffentlichungen werden im Folgenden vorgestellt.

## Untersuchungen des hadronischen Endzustandes

Die Frage, ob der nicht-perturbative Prozess der Fragmentation von erzeugten Quarks in beobachtbare Hadronen von der Art des zugrunde liegenden harten Prozesses abhängt, oder ob die Quark-Fragmentation vielmehr universeller Natur ist wurde in einer der Veröffentlichungen untersucht. Hierzu wurden Multiplizitäts- und Impulsverteilungen von geladenen Hadronen in DIS-Ereignissen mit den von verschiedenen  $e^+e^-$  Experimenten veröffentlichten Ergebnissen verglichen. Für einen aussagekräftigen Vergleich beschränkt sich die Analyse der DIS-Ereignisse auf die dem gestreuten Quark zugeordnete Hemisphäre im so genannten Breit-Bezugssystem, in dem das ausgetauschte raumartige virtuelle Photon zwar einen von Null verschiedenen Impuls  $Q$  aber verschwindende Energie hat. Dies ermöglicht eine wirkungsvolle Abtrennung der mit dem Protonrest assoziierten Teilchen, die sich nicht ohne weiteres mit den in einer  $e^+e^-$  Annihilation erzeugten Teilchen vergleichen lassen. In DIS-Ereignissen ist die Energieskala durch das virtuelle Photon bestimmt und hat für die untersuchte Hemisphäre den Wert  $Q/2$  im Vergleich zur halben Schwerpunktenergie  $E^*/2$  im Falle von  $e^+e^-$  Reaktionen. Die Verteilung der auf die jeweiligen Energieskala bezogenen Impulse  $x_p$  in Abhängigkeit von  $x_p$  und von der Skala zeigt Abbildung 25.

Der Vergleich mit den  $e^+e^-$  Daten unterstützt das Konzept der Universalität der Quark-Fragmentation, insbesondere, wenn der Einfluss von DIS Prozessen höherer Ordnung berücksichtigt wird, die bei der  $e^+e^-$  Annihilation nicht vorhanden sind. Sehr gute Übereinstimmung findet sich ebenfalls im Vergleich mit Monte Carlo Vorhersagen, die auf Matrixelementen führender Ordnung (LO), kombiniert mit Parton-Schauern (PS) beruhen. Hingegen sind QCD Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO) nicht in der Lage

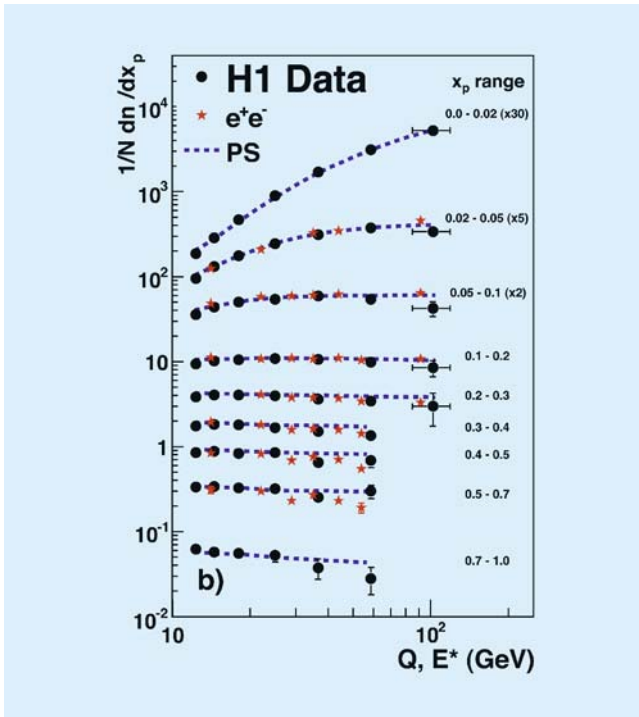


Abbildung 25: Normierte Verteilung des skalierten Impulses  $x_p$  als Funktion von  $Q$  (bzw.  $E^*$  für  $e^+e^-$  Annihilation) für verschiedene  $x_p$  Intervalle im Vergleich mit Monte Carlo Vorhersagen.

die in den Daten beobachteten Skalenverletzungen zu beschreiben. Damit können diese Daten bisher nicht für eine Bestimmung der Kopplungsstärke der starken Wechselwirkung  $\alpha_s$  in NLO verwendet werden.

## Jet-Produktion

Sehr viel besser für eine Messung von  $\alpha_s$  eignet sich dagegen eine neue Analyse von HERA I Daten zur inklusiven Jet-Produktion im Breit-Bezugssystem, da sie unmittelbar sensitiv auf diese fundamentale Größe ist. Die Analyse profitiert gegenüber früheren Veröffentlichungen nicht nur von einer Faktor zwei höheren Luminosität und einer höheren Schwerpunktennergie, sondern auch von einem verbesserten Verständnis der hadronischen Energieskala. Einzel- und doppel-differentielle Wirkungsquerschnitte in Abhängigkeit von der Jetenergie  $E_T$  und von  $Q^2$  im Bereich  $150 < Q^2 < 15000 \text{ GeV}^2$

wurden gemessen. Sie werden gut durch Rechnungen der QCD in NLO beschrieben. Durch eine Anpassung der NLO Vorhersagen an die gemessenen Wirkungsquerschnitte lässt sich  $\alpha_s$  bestimmen. Es zeigt sich aber, dass sich der Einfluss einiger experimenteller Unsicherheiten und die Abhängigkeit von der verwendeten Partondichtevertellung deutlich reduzieren lässt, wenn stattdessen das Verhältnis von inklusivem Jetquerschnitt zu dem gut bestimmten inklusiven DIS-Wirkungsquerschnitt verwendet wird. Der so ermittelte Wert für  $\alpha_s(M_Z)$  ist in guter Übereinstimmung mit dem Weltmittelwert und hat eine Genauigkeit, die vergleichbar ist mit der anderer vor kurzem veröffentlichter Messungen. Der dominierende Beitrag zum Fehler dieser Messung von  $\alpha_s(M_Z)$  beruht auf einer Abhängigkeit des Ergebnisses von der Wahl der Renormierungsskala  $\mu_r$ , die den Einfluss bisher noch unberücksichtigter Beiträge höherer Ordnung widerspiegelt. Abbildung 26 demonstriert sowohl das so genannte “running” von  $\alpha_s$  als Funktion von  $\mu_r$ , als auch die Abhängigkeit des extrahierten Wertes  $\alpha_s(M_Z)$  von der Wahl der verwendeten Skala.

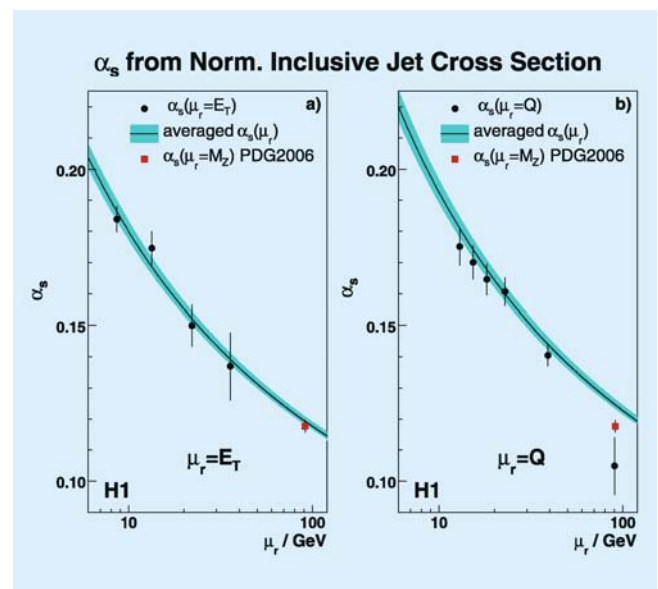


Abbildung 26: Messergebnisse für  $\alpha_s$  für die beiden Renormierungsskalen  $\mu_r = E_T$  bzw.  $\mu_r = Q$ . Die Kurve zeigt die Entwicklung von  $\alpha_s(M_Z)$ , die sich aus der Kombination aller Messpunkte ergibt. Die Breite des Bandes entspricht dem experimentellen Fehler.



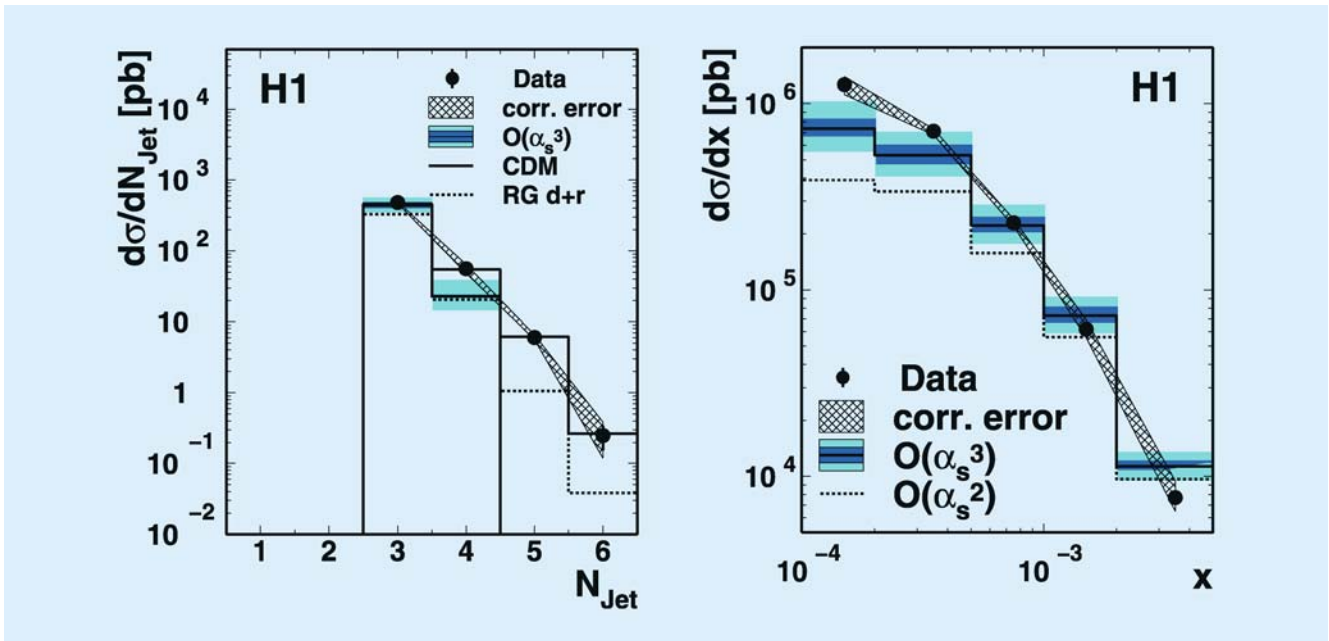


Abbildung 27: Differentieller Multijet Wirkungsquerschnitt als Funktion der Anzahl der Jets und der Skalenvariablen  $x$  im Vergleich mit NLO  $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$  Rechnungen und Monte Carlo Vorhersagen von RAPGAP bzw. dem Colour Dipole Model (CDM).

Die Messung des Wirkungsquerschnittes für Ereignisse mit mehr als einem Jet bei hohen Transversalimpulsen und bei hohem  $Q^2$  kann direkt mit theoretischen Vorhersagen verglichen werden. Die entscheidende Frage ist, ob die Rate, mit welcher Jets bei HERA produziert werden, von der Theorie korrekt beschrieben wird. Die Produktion von 2- bzw. 3-Jet Ereignissen kann in nächstführender Ordnung in der starken Kopplung  $\alpha_s$  als Produktion von 2 bzw. 3 Partonen berechnet werden. Für die Berechnung der Produktion von Multi-Jet Ereignissen mit mehr als 3 Jets müssen hingegen Näherungen in Form von Parton-Schauern gemacht werden, welche auf QCD-Entwicklungsgleichungen (DGLAP, CCFM oder BFKL) beruhen.

In einer weiteren Veröffentlichung wird die Messung der Wirkungsquerschnitte von 3 bzw. 4 Jets in tiefinelastischer Streuung beschrieben. Während die Rate der 3-Jet Ereignisse mit der Theorie übereinstimmt (siehe Abbildung 27), ist schon bei Ereignissen mit 4 Jets die gemessene Rate etwa dreimal so hoch wie die

Vorhersage ( $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$ ). Deutlicher wird der Unterschied im Wirkungsquerschnitt als Funktion der Variablen  $x$ , welche den Bruchteil des Partonimpulses vom Protonimpuls angibt (siehe Abbildung 27 rechts). Bei kleinen Werten  $x$ , die diesen Prozess dominieren, ist der gemessene Wirkungsquerschnitt deutlich größer als die theoretische Vorhersage.

Während vollständige Rechnungen nur bis zur  $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$  verfügbar sind, und die Unterschiede in den Vorhersagen für den Wirkungsquerschnitt zwischen  $\mathcal{O}(\alpha_s^2)$  und  $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$  besonders bei kleinem  $x$  sehr groß sind, ist zu erwarten, dass zur korrekten Beschreibung der Messungen Beiträge höherer Ordnung in  $\alpha_s$  notwendig sind. Solche Beiträge sind in Monte Carlo Ereignisgeneratoren in Form der Parton-Schauer implementiert. Es zeigt sich, dass Simulationen, welche über DGLAP hinausgehen, die Messungen besser beschreiben können. Diese Resultate sind auch von großer Bedeutung für die Interpretation zukünftiger Messungen der Jet-Produktion am LHC.

## Diffraktion

Eine besondere Klasse von Ereignissen mit Jets, welche zusätzlich in der Richtung der auslaufenden Proton-Fragmente eine Lücke im Teilchenfluss aufweisen (*rapidity gap*), wurde in zwei weiteren Veröffentlichungen untersucht. Das Fehlen von Teilchen in diesem Rapiditätsbereich wird auf den Austausch eines „Farb-neutralen“ Teilchens (auch Pomeron genannt) zurückgeführt. Ähnlich wie bei nicht-diffraktiven Resultaten, wo Jet-Messungen benutzt werden, um die Partondichteverteilungen, im Wesentlichen die Gluon-Verteilung, im Proton zu bestimmen, werden sie hier dazu verwendet die Struktur des Pomerons zu untersuchen. In tiefinelastischer Streuung wurden hierzu Ereignisse mit mindestens 2 Jets mit großem Transversalimpuls und einem *rapidity-gap* selektiert. Aus vorherigen Messungen wissen wir, dass im Wesentlichen Gluonen die Struktur des Pomerons bestimmen. Diffraktive Jet-Ereignisse finden damit hauptsächlich über die Fusion eines Photons und eines Gluons in ein Quark-Antiquark Paar statt. Aus der invarianten Masse der beiden Jets läßt sich die Größe  $z_P$  bestimmen, welche ein Maß für den Impulsbruchteil des an der Streuung beteiligten Gluons am Pomeronimpuls ist. Der gemessene differentielle Wirkungsquerschnitt für diffraktive Jet-Produktion als Funktion von  $z_P$  ist in Abbildung 28 gezeigt. Die Messung wird mit einer Vorhersage verglichen, welche auf diffraktiven Partondichten, die aus Anpassungen an H1-Daten der inklusiven Diffraktion gewonnen wurden beruht. Während das innere Fehlerband um die Vorhersage nur die Unsicherheiten aufgrund von Partondichte und Hadronisierung wiedergibt, ist im äusseren Band zusätzlich der Einfluss der Skalenunsicherheit enthalten. Es zeigt sich, dass die Daten im Bereich  $z_P > 0.3$  signifikant von den Vorhersagen abweichen und damit eine zusätzliche Sensitivität auf die Partondichten in diesem Bereich haben. Durch eine gemeinsame Anpassung an die inklusiven und die 2-Jet Daten wurde die diffraktive Gluondichte neu bestimmt. Das Ergebnis ist zusammen mit den vorherigen Parametrisierungen in Abbildung 29 gezeigt. Man sieht deutlich, dass die Gluondichte in der neuen Parametrisierung bei großem  $z$  wesentlich reduziert ist.

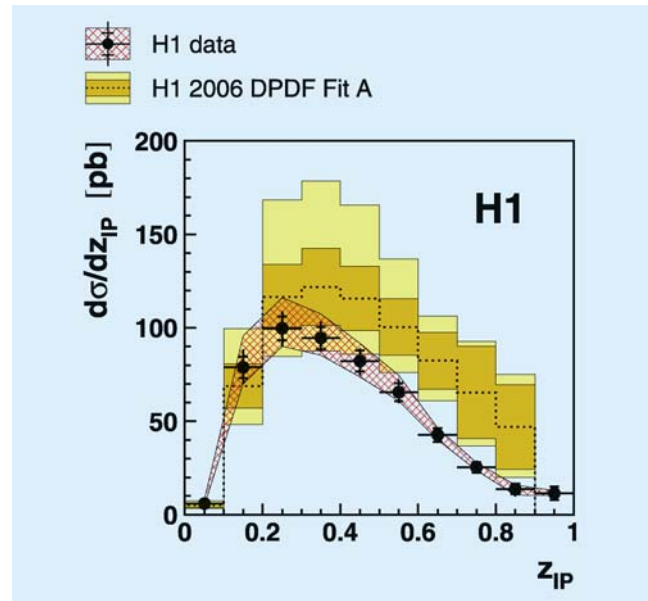


Abbildung 28: Differentieller DIS-Wirkungsquerschnitt von diffraktiven Dijet Ereignissen als Funktion der Skalenvariablen  $z_P$  im Vergleich mit NLO Vorhersagen basierend auf einer Anpassung an inklusive Daten von H1.

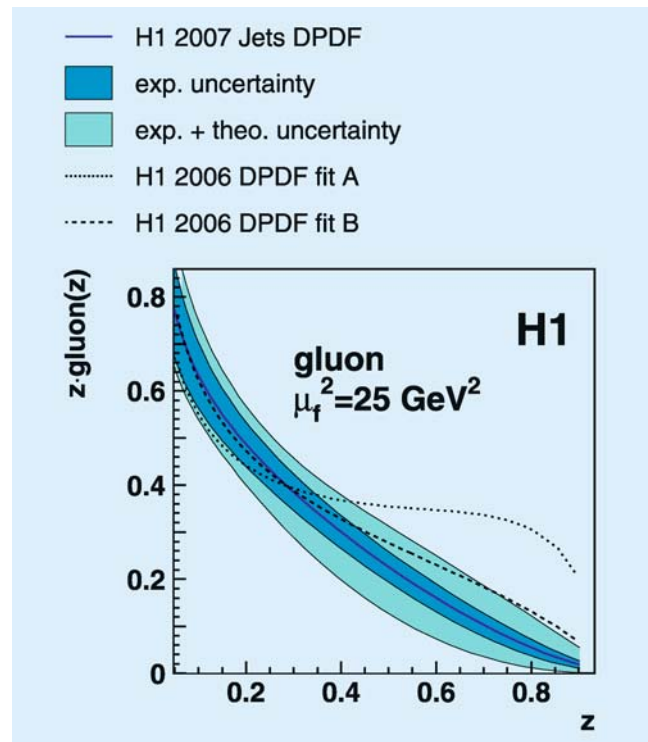


Abbildung 29: Diffraktive Gluondichte als Funktion des Gluonimpulsbruchteils  $z$ .

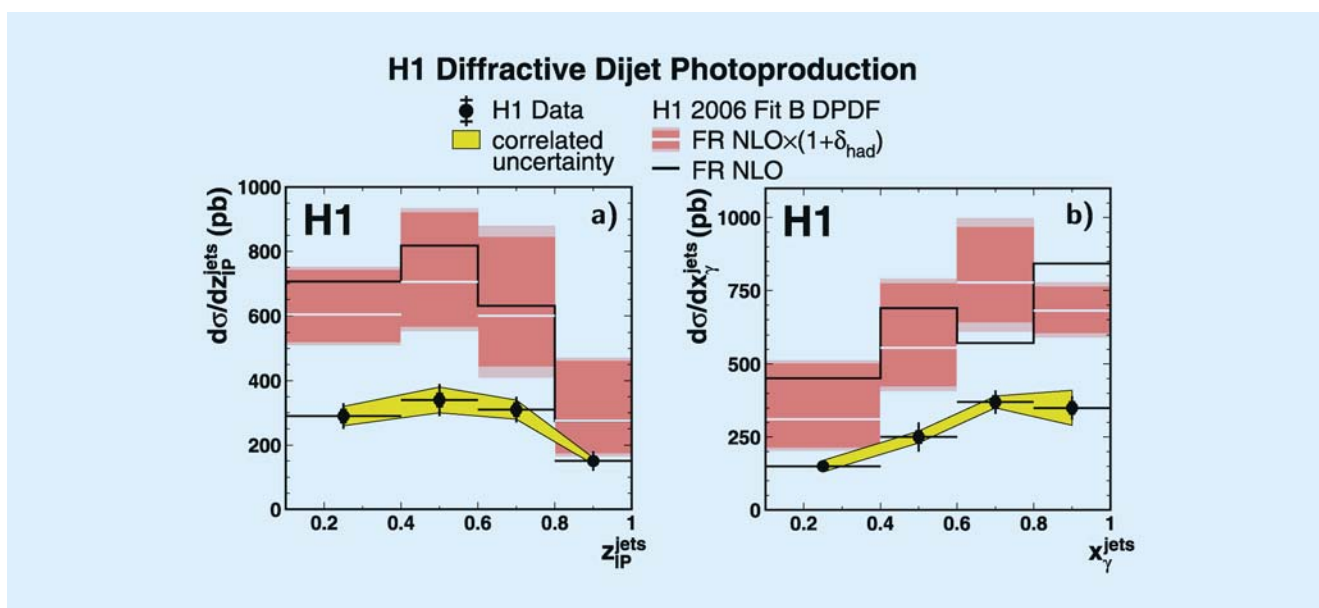


Abbildung 30: Differentieller Wirkungsquerschnitt der diffraktiven Dijet Photoproduktion als Funktion des Gluonimpulsbruchteils  $z_P$  und des Photonimpulsbruchteils  $x_\gamma$ .

Eine wesentliche Voraussetzung zur theoretischen Beschreibung der Messungen von Jet-Produktion ist das sogenannte Faktorisierungstheorem, welches besagt, dass sich der Photon-Proton Wirkungsquerschnitt aus dem Produkt von universeller Partonendichte des Protons und Wirkungsquerschnitt des partonischen Subprozesses (hier der Photon-Gluon Fusion) ergibt. Obwohl dieses Faktorisierungstheorem bisher nur für wenige Prozesse theoretisch bewiesen werden konnte, wird es dennoch zur Beschreibung von vielen Prozessen angewandt. Die Annahme der Existenz universeller Partondichten bedeutet zum Beispiel, dass Partondichten, welche in tiefinelastischer Streuung bei HERA bestimmt wurden, für die Berechnung von anderen Prozessen bei TeVatron und LHC ebenfalls Gültigkeit haben. Da diese Annahme eine zentrale Rolle bei der Interpretation von Messergebnissen spielt, ist es wichtig, sie experimentell zu überprüfen.

In einer weiteren Veröffentlichung wurde die Faktorisierungshypothese getestet, indem die Messung von diffraktiven Jet-Ereignissen auch auf den Bereich der Photoproduktion ( $Q^2 \rightarrow 0$ ) ausgedehnt wurde. In quasi-reeller Photoproduktion kann das Photon nicht nur als

punktförmiges Teilchen an der Wechselwirkung teilnehmen, sondern vorher in ein Quark-Antiquark Paar fluktuieren, wodurch es wie ein Hadron mit innerer Struktur erscheint. In Ereignissen der diffraktiven Dijet Produktion kann man sowohl den Impulsanteil  $z_P$  eines Partons am Impuls des Targets (hier Pomeron), als auch den Impulsanteil  $x_\gamma$  eines Partons am Impuls des Photons rekonstruieren. Der gemessene Wirkungsquerschnitt als Funktion dieser Größen ist in Abbildung 30 gezeigt und wird mit der theoretischen Vorhersage unter Benutzung der vorher beschriebenen diffraktiven Partondichten verglichen. Man sieht deutlich, dass die Vorhersage etwa doppelt so hoch ausfällt wie die Messung und interpretiert dies als Indiz für die Brechung des Faktorisierungsansatzes in Photoproduktion. Eine ähnliche Beobachtung wurde schon bei diffraktiver Jet-Produktion am TeVatron gemacht, allerdings ist dort der Unterschied zwischen Experiment und Theorie noch wesentlich größer. Modelle, in denen diese Abweichungen der TeVatron Messungen durch Sekundärwechselwirkungen mit den Proton-Fragmenten erklärt werden sind jedoch nicht mit der hier gemachten Beobachtung verträglich, dass die Unterdrückung unabhängig von  $x_\gamma$  ist. Ein genaueres Verständnis die-



ses Unterdrückungsmechanismus ist aber wichtig auch für die Interpretation von Multi-Jet Produktion bei LHC und erfordert weitere theoretische Untersuchungen.

Die diffraktive Wechselwirkung ist auch bei exklusiver Produktion von Photonen von großer Bedeutung. In einer weiteren Veröffentlichung wird der Prozess  $\gamma^* + p \rightarrow \gamma + p$  bei hohem  $Q^2$  untersucht, wobei das Photon im Detektor nachgewiesen wird und das elastisch gestreute Proton den Detektor unter kleinem Winkel unbeobachtet verlässt. Dieser Prozess wird "Deeply Virtual Compton Scattering" (DVCS) genannt. Er ist das Pendant zur exklusiven Vektor Meson Produktion (z. B.  $\gamma^* + p \rightarrow J/\psi + p$ ), hat allerdings wesentlich kleinere theoretische Unsicherheiten, da man keine Wellenfunktion des Vektormesons berücksichtigen muss. Wie schon die diffraktive Jet-Produktion ist auch der DVCS-Prozess direkt von der Gluondichte des Targets abhängig. Der Wirkungsquerschnitt steigt sehr stark als Funktion der Photon-Proton Schwerpunktsenergie  $W$  an (Abbildung 31), was eine direkte Konsequenz der zu kleinen  $x$ -Werten stark ansteigenden Gluondichte ist.

Die eindeutige experimentelle Signatur des Prozesses erlaubt es, den Impulsübertrag  $t$  am Proton Vertex zu bestimmen. In weichen diffraktiven Wechselwirkungen

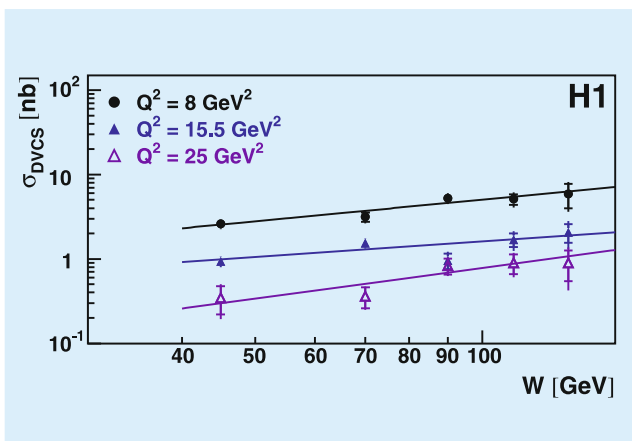


Abbildung 31: Totaler Wirkungsquerschnitt für DVCS als Funktion der Photon-Proton Schwerpunktsenergie  $W$  für verschiedene Werte von  $Q^2$ .

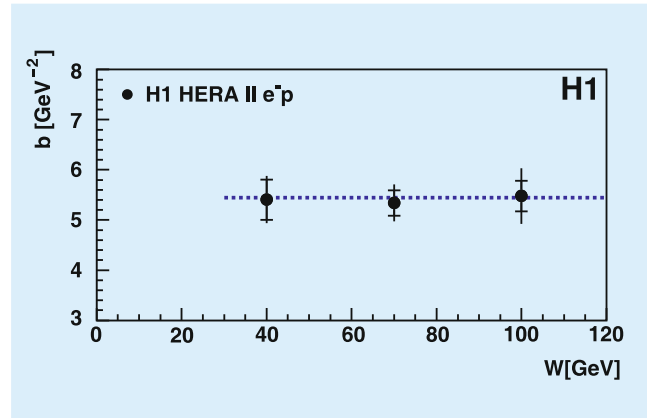


Abbildung 32: Abhängigkeit des für den DVCS-Prozess gemessenen Parameters  $b$  als Funktion von  $W$ .

gen beobachtet man üblicherweise das als *shrinkage* bezeichnete Verhalten: die durch den Parameter  $b$  charakterisierte exponentielle Verteilung des Impulsübertrages  $d\sigma/dt \sim \exp(-b|t|)$  wird mit steigender Energie  $W$  zunehmend steiler. Abbildung 32 zeigt jedoch, dass sich der gemessene Parameter  $b$  in dieser Messung nicht signifikant mit der Schwerpunktsenergie  $W$  ändert. Dies wird als ein Hinweis darauf gedeutet, dass die DVCS Produktion bei hohem  $Q^2$  nicht durch weiche Diffraction beschrieben ist, sondern ein perturbativer Prozess ist, bei dem die Gluondichte im Protontarget eine entscheidende Bedeutung hat.

## Erzeugung isolierter Photonen

Lässt man nun in tiefinelastischer Photon Produktion die Bedingung für Diffraction (keine weiteren Teilchen zusätzlich zum Photon) fallen, dann gelangt man zur so genannten prompt-Photon Produktion in DIS,  $ep \rightarrow e\gamma X$ . Dieser Prozess ist wesentlich schwieriger theoretisch zu beschreiben, da erheblich mehr Subprozesse zum Endzustand beitragen können. Auch die experimentelle Messung ist komplizierter, da man das Photon nun zwischen weiteren Teilchen isolieren und identifizieren muss. Verlangt man zusätzlich zum Photon bei hoher Transversalenergie noch einen Jet, dann ergibt sich der gemessene Wirkungsquerschnitt wie in Abbildung 33 dargestellt.

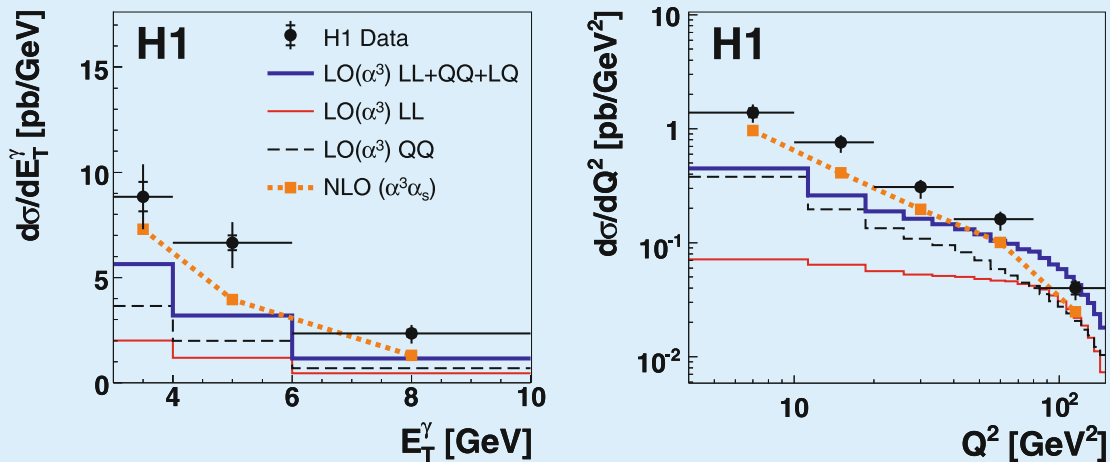


Abbildung 33: Differentieller Wirkungsquerschnitt für Photon plus Jet Produktion in DIS als Funktion der Photon Transversalenergie und von  $Q^2$ .

Man erkennt, dass alle theoretischen Vorhersagen signifikant unter den Messungen liegen, wobei die Vorhersagen in nächstführender Ordnung, d. h. in  $\alpha^3\alpha_s$  die Daten am besten beschreiben.

## Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Im Berichtsjahr wurden zwei Veröffentlichungen publiziert, in denen nach Physik jenseits des Standardmodells gesucht wurde. Die erste bezieht sich auf leptonenzahlverletzende Prozesse und die zweite auf die Suche nach spezifischen aus fünf Quarks aufgebauten Teilchen.

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik postuliert die Erhaltung der Leptonenzahl separat für Leptonen des Elektron-, Muon- und Tau-Types. Experimentell hat man jedoch schon Abweichungen von diesem Postulat für die neutralen Leptonen (Neutrinos) durch Nachweis der Neutrinooszillationen beobachtet. Von großer Bedeutung für die Physik jenseits des Standardmodells wäre die Beobachtung von leptonenzahlverletzenden Prozessen auch im Bereich der geladenen

Leptonen. In Experimenten bei relativ niedrigen Energien hat man solche Prozesse bisher nicht beobachtet und Grenzen auf ihre Häufigkeit abgeleitet. HERA erlaubt die Suche nach leptonenzahlverletzenden Prozessen bei sehr hohen Energien. Der häufigste im Standardmodell vorhergesagte Streuprozess bei HERA ist  $ep \rightarrow eX$ , d. h. im Endzustand findet sich das gestreute Elektron wieder, balanciert durch einen hadronischen Endzustand X. Sollte die Leptonenzahl nicht erhalten sein, würde man auch Prozesse wie  $ep \rightarrow \mu X$  oder  $ep \rightarrow \tau X$  erwarten. Die Suche nach diesen Prozessen ist die Thematik der hier beschriebenen Publikation. Solche leptonenzahlverletzenden Prozesse könnten z. B. durch Leptoquarks vermittelt werden, die an die Leptonen verschiedener Generationen koppeln.

Der H1 Detektor eignet sich sowohl hervorragend dafür den hadronischen Endzustand X, als auch Elektronen und Muonen zu vermessen. Taus werden entweder durch ihre leptonischen Zerfälle in  $e$  bzw.  $\mu$  plus die entsprechenden Neutrinos nachgewiesen, oder durch die Charakteristika ihrer hadronischen Zerfälle. Eine wesentliche Aufgabe bei der Suche nach seltenen Prozessen ist es, Ereigniserektionen zu definieren, die bei möglichst hoher Effizienz für den gesuchten Prozess

den Untergrund aus Standardmodellprozessen minimieren. Dieses gelang bei dieser Analyse sowohl im  $\mu$ -, als auch im  $\tau$ -Kanal. Im  $ep \rightarrow \mu X$ -Kanal erwartete man nach allen Analyseschritten ungefähr ein Ereignis, konsistent mit der Tatsache, dass kein Ereignis in den Daten gesehen wurde.

Im  $ep \rightarrow \tau X$  Kanal wurde ein Ereignis beobachtet bei einer Erwartung von ungefähr fünf Ereignissen. Diese Zahlen zeigen, dass bei HERA keine Evidenz für leptonenzahlverletzenden Prozesse gefunden wurde. Quantitativ kann man dann Ausschlussgrenzen auf die Kopplungsstärke  $\lambda$  des hypothetischen leptonenzahlverletzenden Leptoquarks als Funktion der Leptoquarkmasse bestimmen. Dies ist am Beispiel der  $e \rightarrow \mu$  verletzenden skalaren Leptoquarks der Fermionenzahl  $F = 0$  in Abbildung 34 dargestellt. Kopplungsstärken oberhalb der dargestellten Linien sind mit 95% Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen. Nimmt man zusätzlich

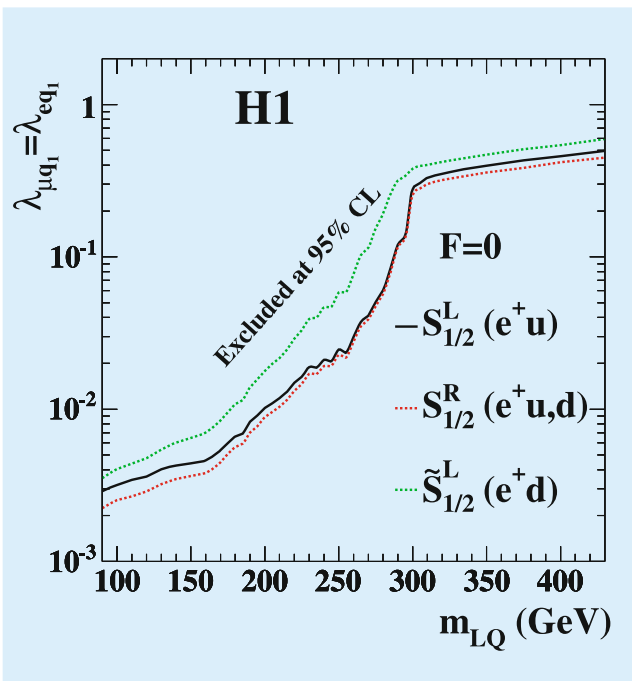


Abbildung 34: Grenzen auf die Kopplungskonstante leptonzahlverletzender ( $e \rightarrow \mu$ ) skalarer Leptoquarks der Fermionenzahl  $F = 0$  als Funktion der Leptoquarkmasse.

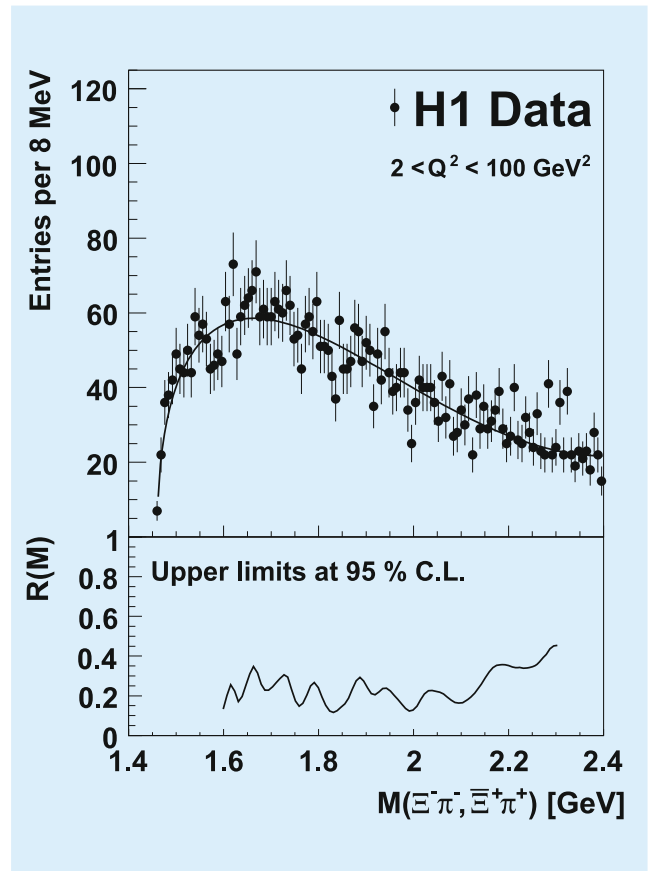


Abbildung 35: Invariante Masse des  $X \rightarrow \Xi\pi$  Systems. Im unteren Teil ist die relative (siehe Text) obere Grenze auf den Produktionswirkungsquerschnitts gezeigt.

an, dass die Kopplungsstärke so groß ist wie die elektromagnetische Kopplung ( $\lambda = 0.3$ ), kann man bei Betrachtung aller verschiedenen Typen von Leptoquarks für  $e \rightarrow \mu$  ( $e \rightarrow \tau$ ) verletzende Prozesse Leptoquarks bis zu Massen von 459 (379) GeV ausschließen. Die gefundenen Ausschlussgrenzen sind vergleichbar mit den Resultaten aus Experimenten bei niedrigeren Energien, in vielen Fällen, besonders für die  $e \rightarrow \tau$  Leptonzahlverletzung, jedoch noch restriktiver.

Alle stark wechselwirkenden Teilchen, die bisher experimentell beobachtet wurden lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Zum einen sind dies die Mesonen, die aus einem Quark und einem Antiquark aufgebaut sind, und zum anderen die Baryonen, die aus drei Quarks zu-

sammengesetzt sind. Für Aufregung sorgten die im Jahr 2003 und danach in einigen Experimenten gemachten Beobachtungen eines relativ langlebigen Teilchens  $\Theta_s$ , das im Rahmen des Quarkmodells nur als Bindungszustand von fünf Quarks (Pentaquark) aufgebaut werden kann. Obwohl einige andere Experimente keine Evidenz für dieses Teilchen fanden, startete eine intensive Suche nach weiteren Pentaquarkzuständen. Im Rahmen verschiedener auf QCD basierender theoretischer Modelle existieren Pentaquarkzustände in Multipletts und es werden neben dem  $\Theta_s$  weitere Teilchen mit spezifischen Quantenzahlen vorausgesagt. Eines von Ihnen ist das als X bezeichnete Teilchen mit einer zweifach negativen Seltsamkeit, das sowohl im zweifach negativ geladenen Zustand  $X^{--}$  als auch im neutralen Zustand  $X^0$  existieren sollte. In Proton-Proton-Streuung wurde von dem NA49 Experiment am CERN Evidenz für diese Zustände bei einer Masse von 1863 MeV gefunden. Die Suche nach diesen Teilchen bei HERA ist Inhalt der zweiten in diesem Abschnitt beschriebenen Veröffentlichung.

Das  $X^{--}$  wird gesucht über den Zerfall  $\Xi^-\pi^-$  und das  $X^0$  über den Zerfall in  $\Xi^-\pi^+$ . Das  $\Xi^-$  wird über den bekannten Zerfall  $\Lambda\pi^-$  und das  $\Lambda$  über den  $p\pi^-$  Zerfall nachgewiesen. Insgesamt gilt es den Zerfall  $X \rightarrow p\pi\pi$  mit den Zwischenstufen des  $\Xi^-$  und des  $\Lambda$  zu analysieren. Dieses gelingt mit sehr guter Rekonstruktionsauflösung durch genaue Vermessung der Teilchenspuren im zentralen Spurdetektor des H1 Experiments. Abbildung 35 zeigt die gemessene Anzahl selektierter Ereignisse als Funktion der Masse des X Systems. Über einem kontinuierlichen Untergrund (eingezeichnete Linie) ist kein Anzeichen einer Resonanzüberhöhung zu beobachten, auch nicht bei der von NA49 berichteten Masse  $M_X = 1863$  MeV. Aus den Daten kann man dann eine obere Grenze auf den Produktionswirkungsquerschnitt des hypothetischen X Teilchen bestimmen. Diese ist relativ zum Produktionswirkungsquerschnitt des wohlbekannteren  $\Xi(1530)$  Teilchens im unteren Teil der Figur dargestellt. Die H1 Daten bestätigen damit nicht die NA49 Beobachtung eines potentiellen Pentaquarkzustandes zweifach negativer Seltsamkeit.