

Abbildung 13: Die Abhängigkeit des inklusiven Wirkungsquerschnitts für die charged current Wechselwirkung $e^+p \rightarrow \bar{\nu}X$ vom Polarisationsgrad des Positronstrahls. Im Vergleich zu den H1-Datenpunkten ist die Vorhersage des Standardmodells unter Verwendung der H1 PDF 2000 Partondichtefunktionen dargestellt, sowie ein Geradenfit an die Messwerte.

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, Univ. of Montenegro Podgorica, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Inst. for Nucl. Research and Nucl. Energy Sofia, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: M. Klein, DESY

Das Jahr 2005 war für die H1-Kollaboration das bisher erfolgreichste Jahr seit dem Beginn der Datennahme 1992. In einer bis Ende 2005 ununterbrochenen, langen Phase des HERA Betriebs, konnte das H1-Experiment mehr als 100 pb^{-1} an guten Daten aufzeichnen, etwa so viel, wie insgesamt in der HERAI Periode registriert wurde. HERA lieferte ohne größere Störungen Daten mit hohen Elektron- und Protonströmen sowie einer spezifischen Luminosität, die etwa viermal so hoch war wie vor dem so genannten *Luminosity Upgrade*, der im Jahr 2001 durchgeführt wurde. Waren die ersten Jahre der HERA II Phase noch durch zum Teil sehr hohen Strahluntergrund gekennzeichnet, so verbesserten sich das Vakuum in der Nähe der H1-Wechselwirkungszone sowie die Stabilität des HERA Betriebs gegenüber 2003/04 wesentlich. Neben den verbesserten Strahlbedingungen ist es wichtig hervorzuheben, dass der H1-Detektor zuverlässig lief, so zum Beispiel mit stabilen und sorgfältig optimierten Triggerbedingungen, so dass das Jahr 2005 Daten hoher Qualität erbracht hat. Ein Teil dieser Daten konnte daher bereits im Frühjahr 2006 in Japan auf der alljährlichen Spezialkonferenz über Tiefinelastische Physik und Quantenchromodynamik vorgestellt werden, so

z. B. Ergebnisse zur Suche nach neuen Teilchen und zur Messung der inklusiven Streuquerschnitte.

Im Unterschied zur ersten Phase von HERA werden jetzt Kollisionen von longitudinal polarisierten Leptonen mit Protonen aufgezeichnet. Durch den Sokolov-Ternov-Effekt werden im Ringbeschleuniger die Elektronen oder Positronen transversal polarisiert. Durch die im Jahr 2001 vor und hinter den ep-Wechselwirkungspunkten eingebauten Spin-Rotatoren wird die Spinorientierung longitudinal ausgerichtet und damit zu einer für Tests der schwachen Wechselwirkung zugänglichen Größe. Erstmals konnte somit die Abhängigkeit des Streuquerschnitts der geladenen Stromwechselwirkung vom Polarisationsgrad des Positronstrahls in der Reaktion $e^+p \rightarrow \bar{\nu}X$ gemessen werden. Die gemessene lineare Abhängigkeit dieses Streuquerschnitts ist ein Resultat für Lehrbücher der schwachen Wechselwirkung. Das in Abbildung 13 dargestellte Ergebnis ist zudem Inhalt der ersten H1-Publikation mit HERA II-Daten.

HERA wird im Jahr 2007 seinen Betrieb einstellen. Die H1-Kollaboration nahm dies zum Anlass, ihr Physikprogramm für die verbleibende Messzeit in seinen wesentlichen Konturen zu definieren. Die Physik der Elektron-Proton-Streuung wird bei H1 in drei wesent-

liche, miteinander zusammenhängende Kapitel gegliedert: i) Präzisionsmessungen zur Partonstruktur des Protons; ii) Untersuchungen zu den Gesetzmäßigkeiten der Partondynamik im Bereich hoher Quark- und Gluondichten (*low x physics*) sowie iii) Suche nach neuen Phänomenen, Teilchen oder seltenen Ereignissen bei großen Skalen oder auch neuen Ansätzen in der QCD, wie die Tief Virtuelle Comptonstreuung (DVCS). Alle diese Untersuchungen sind von großer Bedeutung, nicht nur für das Verständnis der Protonstruktur und der starken Wechselwirkung an sich, sondern auch für die Physik am Large Hadron Collider (LHC), was den Erfolg des von H1 Physikern maßgeblich mitgestalteten HERA-LHC-Workshops erklärt.

Die bisher größte Abweichung von den Vorhersagen des Standardmodells ergab die Analyse von Ereignissen, in denen isoliert auftretende Leptonen, verbunden mit großen nicht-balancierten Transversalimpulsen beobachtet werden. Während deren Häufigkeit die Erwartung des Standardmodells im Fall der Positron-Protonstreuung mit einer Signifikanz von 3.4 Standardabweichungen übertrifft, ergab die Analyse der Elektron-Protondaten des Jahrs 2005 keine Abweichung von der Vorhersage. Um diese Frage aufklären zu können, spricht sich die H1-Kollaboration dafür aus, eine möglichst lange Datennahmeperiode mit Positronen vorzusehen. Ferner führten detaillierte Studien der Kollaboration zu dem Vorschlag, für eine begrenzte Dauer Daten mit erniedrigter Protonstrahlenergie zu nehmen. Dies eröffnet die Möglichkeit, die longitudinale Protonstrukturfunktion, F_L , die zweite fundamentale Strukturfunktion des Protons, zu messen. Die geplante Messung wird Rückschlüsse auf die Gültigkeit der Theorie und speziell das Verhalten der Gluondichte in diesem Teil des Phasenraums erlauben. Mit diesen Plänen sowie dem übergeordneten Ziel, die maximale Menge an Messdaten bis 2007 aufzuzeichnen, steht die Datennahme bei HERA vor ihrem nun absehbaren Abschluss. Angesichts der Tatsache, dass HERA in der verbleibenden Zeit noch eine erhebliche Datenmenge zu liefern verspricht, gelten alle Anstrengungen der Sicherung höchster Qualitätsansprüche, was die Detektoren, Trigger und Onlinesoftware angeht.

Ende 2005 wurde die Datennahme unterbrochen, um bei HERA mehrere große Dipolablenkmagnete (*BU Magnete*) auszutauschen. H1 konnte diese Betriebsunterbrechung dazu nutzen, die in sehr kurzer Zeit in Zeuthen neu aufgebauten Siliziumstreifendetektoren BST und FST wieder zu installieren, die, wie im Vorjahr berichtet, wegen Wasser- bzw. Strahlungsschäden ausgebaut worden waren. Darüber hinaus wurden mehrere andere Komponenten verbessert (wie das ToF System), repariert (CST, CIP) oder teilweise mit neuer Elektronik (SPACAL) ausgerüstet.

Im Jahr 2005 entwickelte sich die Kollaboration kontinuierlich weiter. Kürzlich neu aufgenommene Gruppen fanden ein eigenes Profil und weitere Gruppen haben Interesse bekundet, der H1-Kollaboration beizutreten. Auf diese Weise ist es gelungen, die Anzahl der Autoren nahezu konstant zu halten. Die Analyse aller HERA-Daten ist ein anspruchsvoller Prozess, der noch mehrere Jahre andauern wird. Mitglieder der Kollaboration hielten in 2005 etwa 100 Vorträge auf internationalen Konferenzen, H1 reichte etwa 50 Beiträge zur Europäischen Teilchenphysikkonferenz in Lissabon ein und publizierte im Jahr 2005 in Fachzeitschriften weitere zehn wissenschaftliche Beiträge, die weiter unten kurz vorgestellt werden.

Mit Modellen und Einführungen zum Tag der offenen Tür, der Betreuung der Sommerstudenten sowie von Schülerpraktikanten beteiligte sich die Kollaboration an der Ausbildung von jungen Menschen und Werbung für die Teilchenphysik.

Der H1-Detektor

Datennahme

Nach mehreren Jahren Kollisionen von Positronen und Protonen wurde HERA Ende 2004 erstmals wieder auf Elektron-Proton Streuung umgeschaltet. Die Vakuumbedingungen im Jahr 2005 erwiesen sich als ausreichend gut, um nicht nur einen stabilen Betrieb aufrecht zu erhalten, sondern mehr als doppelt so viel integrierte Luminosität im Vergleich zum vorhergehenden Jahr

aufzuzeichnen. Die für Analysen zur Verfügung stehende Datenmenge von HERA II bei H1 wurde damit ungefähr verdreifacht. Die Richtung der longitudinalen Polarisation der Elektronen wurde in dieser Datenperiode dreimal geändert, um eine möglichst gleichmäßige Aufteilung der Datenmenge auf beide Ausrichtungen zu gewährleisten. In der Datennahmeperiode 2005 zeichnete H1 eine integrierte Luminosität von 156 pb^{-1} auf, davon konnten für 117 pb^{-1} die zentralen Spurkammern mit nomineller Hochspannung betrieben werden. Zu Beginn war die Effizienz der Datennahme noch etwas beeinträchtigt, da nach dem Einbau eines neuen Strahlrohrstücks in der Wartungsperiode 2004 das Vakuum konditioniert werden musste. Ein Leck im Strahlrohr, 14 m vor dem H1-Experiment aus Protonrichtung gesehen, verzögerte die Konditionierung zwischenzeitlich um einige Wochen. Zudem erzeugten Strahlinstabilitäten kurze Spitzen in den Untergrundraten und führten zu gelegentlichen Notabschaltungen der Hochspannung der Spurkammern, die notwendig waren, um diese empfindlichen Detektoren vor Schäden zu schützen. Da als Ursache für die Strahlinstabilitäten Alterungserscheinungen der vertikalen Protonablenkmagnete identifiziert werden konnten, wurde beschlossen, alle Magneten dieses Typs auszutauschen. Die notwendige Neuanfertigung dieser BU-Magnete erforderte es, die ursprünglich für Ende August vorgesehene Wartungsperiode auf Mitte November zu verschieben. Die Datennahmeeffizienz von H1 war mit 95% hoch und die inhärente Totzeit des Triggersystems war mit 9.5% nur unwesentlich höher als die angestrebten 8%. Die Hochspannungseffizienz der zentralen Spurkammern erreichte nach Überwindung der Anfangschwierigkeiten wieder Werte von 80% und mehr. Die Detektor-komponenten von H1 arbeiteten zuverlässig.

Der 2004 installierte Fast Track Trigger (FTT) wurde in den Triggerstufen L1 und L2 während der Datennahme vollständig in Betrieb genommen. Die Triggerstufe L3 wurde für den Betrieb vorbereitet. Das Very Forward Proton Spektrometer (VFPS) wurde erfolgreich in Betrieb genommen und erste Spektren der unter kleinem Winkel gestreuten Protonen aus diffraktiven e-p Streueignissen wurden aufgezeichnet. Im Betrieb des zentralen Siliziumdetektors (CST) traten zunächst

Probleme mit der Ausleseelektronik auf, die durch Einbau neuerer Prozessoren behoben werden konnten. Im weiteren Verlauf des Jahrs zeigten, bedingt durch Kontaktprobleme und defekte Frontendelektronik, einige der 64 Detektoren Ausfallerscheinungen. Die für das H1-Triggersystem unerlässliche zentrale innere Proportionalkammer (CIP) war in der gesamten Datennahmeperiode funktionsfähig. Lediglich in einem Azimut-Sektor war die Redundanz der insgesamt fünf Lagen durch einen teilweisen Ausfall der Frontendelektronik etwas beeinträchtigt. Das SPACAL Kalorimeter, das in Rückwärtsrichtung elektromagnetische Energie misst, zeigte in einigen Auslesekanälen Schwächen in der Signalstärke, die sich auch nicht mehr durch eine Korrektur der Hochspannung alleine kompensieren ließen.

Reparaturen und Erweiterungen

Mit Beginn der Wartungsperiode Mitte November wurden der H1 Detektor geöffnet und einige Detektorkomponenten zur Reparatur ausgebaut. Um Zugang zum zentralen Siliziumdetektor zu erhalten, sowie alle drei Siliziumdetektoren (FST, BST, CST) nach erfolgter Reparatur wieder einbauen zu können, musste das Strahlrohr bei H1, wie schon 2004, geöffnet werden. Um die Vakuumbedingungen möglichst gut zu erhalten, wurde das Strahlrohr mit Stickstoff gespült und die ausgebauten Strahlrohrkomponenten unter Vakuumbedingungen gelagert. Zwölf der insgesamt 40 Elektronikarten der CIP wurden repariert. Bis auf eine Ausnahme wurden damit alle Probleme mit der Ausleseelektronik behoben. Beim SPACAL Kalorimeter wurden 40 Photomultiplier mit zu geringem Verstärkungsfaktor ersetzt oder repariert. Der CST wurde neu verkabelt und die defekten elektronischen Bauteile wurden ausgetauscht, wodurch alle Fehler behoben werden konnten. Die in der Wartungsperiode 2004 wegen Wasser- und Strahlenschäden ausgebauten Forward und Backward Silizium Detektoren (FST und BST) wurden in Zeuthen mit Unterstützung von ZE Hamburg neu aufgebaut. Beim FST wurden neue Sensoren hergestellt sowie die elektronischen Komponenten in strahlungsresistentem Design entwickelt und in kurzer Zeit neu gefertigt.

Der BST erhielt ebenfalls strahlungsresistente Elektronikkomponenten und eine verbesserte Kühlung. Beide Detektoren wurden wie geplant wieder in den Zentraldetektor eingebaut. Zwischen CST und FST wurde ein neuer Szintillationszähler als Strahlungsmonitor eingebaut. Die Segmentierung dieses scheibenförmigen Zählers in zwei radiale Ringe und 16 Azimut-Sektoren ermöglicht zudem die Erweiterung des H1-Triggers in Vorwärtsrichtung. Alle Reparaturarbeiten wurden erfolgreich im gesetzten Zeitrahmen abgeschlossen, die Detektoren eingebaut und getestet. Wesentlich war hierbei, den Zeitplan für das Verschließen des Strahlrohrs vor der Weihnachtspause einzuhalten, so dass das Konditionieren des Vakuums noch im Dezember beginnen konnte.

Physikalische Ergebnisse

Quantenchromodynamik

HERA bietet optimale Voraussetzungen, sämtliche Facetten der QCD zu studieren. Neben Tests der harten Streuprozesse bei hohen Skalen geraten zunehmend auch darüber hinausgehende Gebiete in das Zentrum des Interesses: der Übergang zum nicht-perturbativen Bereich, Hadronisierung und Effekte der Partondynamik jenseits des DGLAP-Formalismus seien hier als Beispiele genannt.

Eine Veröffentlichung im Berichtszeitraum untersucht das Zusammenspiel zwischen perturbativer und nicht perturbativer QCD, durch das Studium von fünf unterschiedlichen, auch in anderen Experimenten untersuchten Ereignisformvariablen in der tiefinelastischen Streuung und bei hohen Impulsüberträgen $\langle Q \rangle$ von 16–116 GeV. Diese Observablen, unter anderem *Thrust* und *Jet Broadening*, charakterisieren die geometrischen Eigenschaften des hadronischen Energieflusses als z. B. kollimiert, isotrop, etc. und zeichnen sich folglich durch Sensitivität auf die perturbative QCD (beschrieben durch Matrixelemente des harten Streuprozesses und die starke Kopplung α_s) einerseits und die Hadronisierung andererseits aus. Die Messung hat vergleichsweise kleine experimentelle Unsicherheiten,

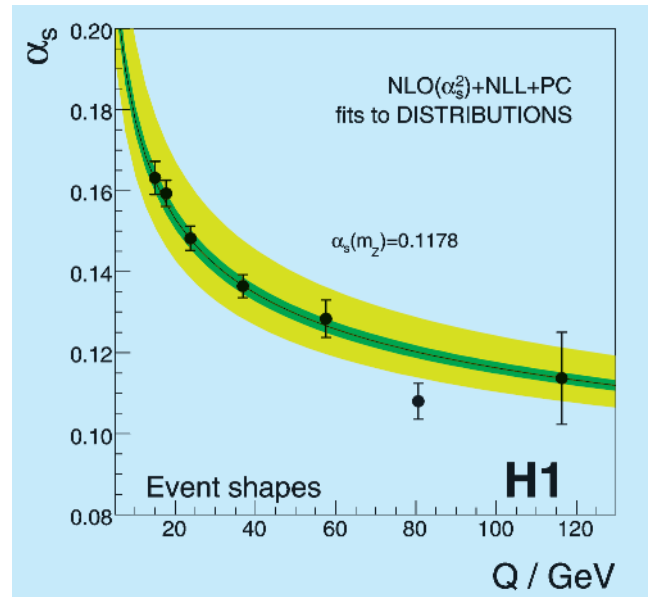


Abbildung 14: Die starke Kopplung α_s als Funktion der Skala Q . Das innere (äußere) schattierte Band repräsentiert die Unsicherheit des Mittelwerts der sieben Einzelbestimmungen durch experimentelle (theoretische) Ursachen.

da sie unempfindlich gegenüber der absoluten Skala der hadronischen Energie ist und keine Beschränkung auf eine minimale transversale Energie impliziert. Die differentiellen Verteilungen der Ereignisformvariablen werden durch eine Theorievorhersage gut beschrieben, die den perturbativen Teil in nächstführender Ordnung, ergänzt um eine Resummation (NLO+NLL), behandelt. Effekte der Hadronisierung werden durch Potenzkorrekturen (PC) proportional zu $1/Q$ berücksichtigt. Im Gegensatz zu Hadronisierungsmodellen basieren diese Potenzkorrekturen auf einem analytischen Ansatz und sind außer von $\alpha_s(m_Z)$ nur von einem einzigen freien Parameter, α_0 , abhängig. Ein Fit der freien Parameter der Theorie, $\alpha_s(m_Z)$ und α_0 , ergibt konsistente Werte für alle fünf untersuchten Ereignisformvariablen. Abbildung 14 zeigt die Evolution der starken Kopplung $\alpha_s(Q)$ mit der Skala. Der sich ergebende Wert $\alpha_s(m_Z)$ ist innerhalb der Unsicherheiten kompatibel mit dem Weltmittelwert. Die erhaltenen Werte von α_0 sind vereinbar mit dem von anderen Untersuchungen bei HERA und LEP. Dies unterstreicht den Erfolg von Powerkorrekturen als Alternative zu klassischen

Hadronisierungsmodellen bei der Beschreibung von Ereignisformvariablen.

Obwohl der Anstieg der Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ mit wachsendem Q^2 bei kleinem x seit den ersten HERA Messungen inzwischen genau vermessen wurde, sind die theoretischen Konsequenzen dieses Effektes nicht vollständig geklärt. Zum einen lassen sich die Daten hervorragend mit dem DGLAP Formalismus in nächstführender Ordnung in der QCD beschreiben, zum anderen gilt aber auch als sicher, dass dieser Formalismus nur eine Approximation darstellt und Abweichungen nicht überraschend wären. Um die Details der Entwicklung der Protonstruktur genauer untersuchen und verstehen zu können, wurde eine spezielle Messung der so genannten *forward jets* vorgeschlagen. Es werden Ereignisse der tiefinelastischen Streuung bei kleinen x mit $Q^2 > 5 \text{ GeV}^2$ selektiert, welche zusätzlich einen hochenergetischen Jet mit Transversalimpuls $p_t > 3.5 \text{ GeV}$ und $E_{\text{jet}} > 29 \text{ GeV}$ (mit Energiebruchteil $x_{\text{jet}} = E_{\text{jet}}/E_p > 0.35$) im Vorwärtsbereich des Detektors ($7^\circ < \Theta_{\text{jet}} < 20^\circ$) aufweisen. Durch den Vorwärtsjet wird eine harte Skala zusätzlich zu Q^2 definiert. Durch die Bedingung $0.5 < p_{t,\text{jet}}^2/Q^2 < 5$ wird erreicht, dass der Beitrag zum Wirkungsquerschnitt, welcher von der DGLAP Entwicklung (Entwicklung der Partonverteilung von kleiner zu großer Skala) kommt, klein bleibt, was es erlaubt, die Partonentwicklung zwischen großem x_{jet} und kleinem x genau zu studieren. In Abbildung 15 ist der gemessene Wirkungsquerschnitt mit theoretischen Vorhersagen im DGLAP Bild in nächstführender Ordnung (NLO) verglichen, wobei ein signifikanter Unterschied zur Messung bei kleinen x auffällt. Ähnliche Ergebnisse wurden schon 1998 publiziert, jedoch mit wesentlich größeren statistischen Fehlern. Die Messung der *forward jets* wurde erweitert, indem zusätzlich zum Vorwärtsjet noch zwei Jets im zentralen Bereich des Detektors verlangt wurden. Damit kann die Entwicklung der Partondichten und die Partonabstrahlung noch detaillierter untersucht werden. Auch hier zeigt sich, dass Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO für drei Jets) die Messungen nicht vollständig beschreiben können. Insgesamt wird deutlich, dass zusätzliche Effekte in den Berechnungen berücksichtigt werden müssen, sei es durch Erweiterung der Entwicklung der

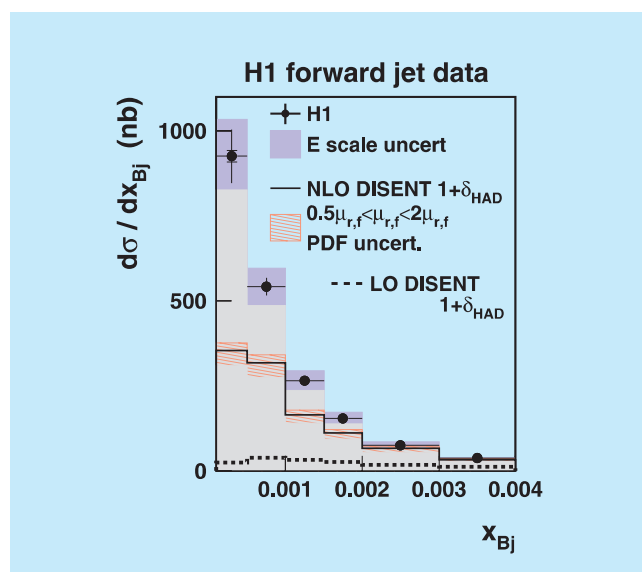


Abbildung 15: Wirkungsquerschnitt für die forward jet Produktion als Funktion von Bjorken-x, verglichen mit Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO).

Partonabstrahlung oder durch Hinzunahme von Beiträgen höherer Ordnung, welche beide Konsequenzen der hohen Gluondichte bei kleinen x sind.

Während Messungen von inklusiven Wirkungsquerschnitten im Wesentlichen zur Bestimmung der longitudinalen Impulsverteilung der Partonen im Proton benutzt werden können, ist die transversale Verteilung der Partonen durch diese Messungen weitgehend unbestimmt. Prozesse mit Vektormesonen V , wie $\gamma^*p \rightarrow Vp$, in welchen das einlaufende Proton nicht zerstört wird, sind geeignet, diese zusätzlichen Freiheitsgrade zu bestimmen. Ein besonderer Fall ist der Prozess $\gamma^*p \rightarrow \gamma p$ (DVCS), wobei nur das Photon im Detektor nachgewiesen wird. Dieser Prozess ist besonders interessant, da viele theoretische Unsicherheiten, wie die Unbestimmtheit der Mesonwellenfunktion, entfallen. Die theoretischen Vorhersagen wurden in den letzten Jahren signifikant verbessert und erlauben heute den Vergleich mit so genannten *generalisierten* Partondichteverteilungen, welche Korrelationen zwischen einzelnen Partonen im Proton wie auch die transversale Bewegung der Partonen im Proton beinhalten. In einer Veröffentlichung wurde der Wirkungsquerschnitt für DVCS im Bereich von Impulsüberträgen $2 < Q^2 < 80 \text{ GeV}^2$ und Photon-

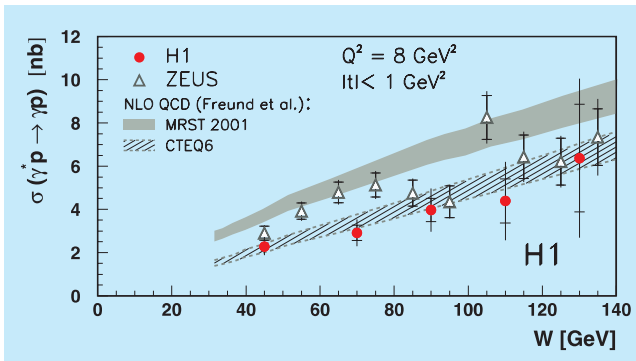


Abbildung 16: Von H1 und ZEUS gemessener Wirkungsquerschnitt für DVCS als Funktion von W , verglichen mit QCD Rechnungen in nächst-führender Ordnung (NLO).

Proton Schwerpunktsenergien $30 < W < 140$ GeV bestimmt. Abbildung 16 zeigt den Wirkungsquerschnitt als Funktion von W im Vergleich mit einer theoretischen Vorhersage in NLO QCD. Zwei unterschiedliche Parametrisierungen der Partonverteilungen geben beide eine gute Beschreibung des Anstiegs mit W , nur die absolute Normierung unterscheidet sich, wobei die H1-Daten die CTEQ6 Parametrisierung bevorzugen.

Physik schwerer Quarks

Erzeugung und Zerfall schwerer Quarks (Charm und Beauty) bei HERA sind von besonderem Interesse für die Untersuchung der QCD und insbesondere der Protonstruktur. Der größte Teil des totalen hadronischen Streuquerschnitts wird von langreichweitigen Wechselwirkungen (*soft interactions*) bestimmt, für die noch keine befriedigende Beschreibung im Rahmen der QCD vorliegt. Die elastische Photoproduktion von Vektormesonen $\gamma p \rightarrow V p$ ist ein spezielles Beispiel für einen solchen Prozess. Hierbei geht das Proton praktisch unverändert aus der Kollision mit dem Photon hervor. Es findet ein farbloser Austausch eines so genannten Pomerons statt, eines hypothetischen Teilchens mit den Quantenzahlen des Vakuums. Ein solcher farbloser Austausch kann in der QCD in einfacher Form als Austausch zweier Gluonen beschrieben werden, die jedoch miteinander stark wechselwirken. Ein Modell für diesen Prozess

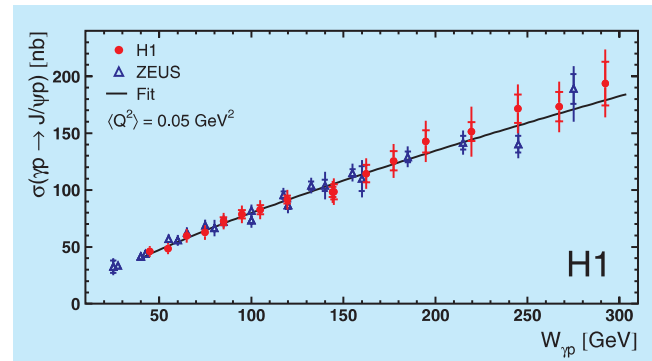


Abbildung 17: Der totale Wirkungsquerschnitt für elastische Photoproduktion von J/Ψ Mesonen als Funktion der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems $W_{\gamma p}$. Die durchgehende Linie zeigt eine Anpassung an die H1-Daten.

wurde von Martin, Ryskin und Teubner (MRT) entwickelt und hier getestet. Es wurden die Wirkungsquerschnitte für die elastische Produktion von J/Ψ Mesonen in Photoproduktion und in Elektroproduktion für Impulsüberträge Q^2 bis 80 GeV^2 gemessen und deren Abhängigkeit von der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems $W_{\gamma p}$ bestimmt. Die leptonenischen Zerfallsprodukte der J/Ψ Mesonen wurden in verschiedenen Detektoren von H1 identifiziert. Abbildung 17 zeigt den totalen Wirkungsquerschnitt für elastische Photoproduktion von J/Ψ Mesonen als Funktion der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems $W_{\gamma p}$ zusammen mit einem Fit an die H1-Daten. Es wurde gezeigt, dass das Modell von MRT eine hohe Sensitivität der Daten auf die Gluondichte des Protons aufweist, besonders im Bereich niedriger Bjorken- x und Q^2 . Weiterhin wurde gezeigt, dass die Produktion von J/Ψ Mesonen und ihre Zerfallswinkelverteilungen konsistent mit der Erhaltung der Helizität im s -Kanal sind.

Der dominante Mechanismus der Erzeugung schwerer Quarks bei HERA ist die so genannte Boson-Gluon Fusion, bei der die Wechselwirkung des vom Elektron abgestrahlten Photons mit einem Gluon aus dem Proton zur Bildung eines schweren Quark-Antiquark-Paars führt. In vorhergehenden Arbeiten zu diesem Thema wurde in der Regel nur die Existenz eines der beiden bei der Boson-Gluon Fusion entstandenen Quarks nach-

gewiesen. Die klassische Methode zum Nachweis von Charmteilchen bei HERA besteht in der Rekonstruktion eines D^* -Mesons, das über den Zwischenzustand eines neutralen D^0 -Mesons in die Endzustandsteilchen $K\pi\pi$ zerfällt. Hingegen benutzen viele Arbeiten zur Beauty-Produktion die semi-leptonischen B-Zerfälle mit einem Myon im Endzustand. In einer Arbeit wurden nun Photoproduktionsereignisse untersucht, die sowohl ein D^* als auch ein Myon enthalten. Obwohl diese zusätzliche Bedingung zunächst zu einer reduzierten Nachweiswahrscheinlichkeit führt und daher die Analyse der gesamten HERA I-Daten erforderlich macht, erlauben die so selektierten Ereignisse weiterreichende Tests der perturbativen QCD in NLO. Die Zuordnung zwischen Myon und D^* zu b-Quark, bzw. c-Quark ist nicht eindeutig, da auch c-Quarks semi-leptonisch zerfallen können und b-Quarks häufig über den Zwischenzustand Charm zerfallen. So kommt es vor, dass sowohl das nachgewiesene Myon, als auch das D^* -Meson aus dem Zerfall ein und desselben b-Quarks stammen. Um die einzelnen Beiträge von Charm und Beauty voneinander separieren zu können, muss man daher ihre unterschiedlichen Korrelationen zwischen dem Öffnungswinkel zwischen D^* und Myon und dem Produkt ihrer elektrischen Ladung ausnutzen. In führender Ordnung beträgt der Öffnungswinkel zwischen den beiden schweren Quarks exakt 180° , während in nächstführender Ordnung die Abstrahlung von harten Gluonen zu einer signifikanten Abweichung von diesem Wert führen kann. Der auf diese Weise bestimmte Wirkungsquerschnitt für Charm stimmt gut mit den NLO QCD Vorhersagen überein, während der gemessene Beauty-Wirkungsquerschnitt höher ist als erwartet. Da in dieser Analyse im Gegensatz zu früheren Beauty-Analysen keine hochenergetischen Jets verlangt werden, ist der gemessene kinematische Bereich durch niedrigere $b\bar{b}$ Schwerpunktsenergien gekennzeichnet. Der Vergleich des Verlaufs von gemessenen differentiellen Verteilungen zeigt im Allgemeinen gute Übereinstimmung mit QCD Rechnungen, die die Effekte von höheren Ordnungen berücksichtigen.

Eine weitere Veröffentlichung schließt unmittelbar an eine im vorangegangenen Berichtsjahr veröffentlichte Analyse an. In einer inklusiven Analyse der

Zerfallslängen wurde der zentrale Siliziumstreifen-Detektor (CST) dazu verwendet, Ereignisse mit Charm- und Beauty-Teilchen anzureichern und deren relative Anteile zu bestimmen, ohne explizit einzelne D- oder B-Mesonen zu rekonstruieren. In der neuen Analyse wurde der kinematische Bereich der tief-inelastischen Streuung zu kleineren Q^2 -Werten, $12 < Q^2 < 60 \text{ GeV}^2$, hin erweitert. Da in diesem Bereich die Produktion von Charm und Beauty relativ zu den leichten Quarks noch stärker unterdrückt ist als für höhere Q^2 , ist die Bestimmung ihres Anteils experimentell schwieriger. Dennoch gelang mit dieser Methode die Messung der Beiträge zur Strukturfunktion, F_2^c und F_2^b , im Bereich kleiner Q^2 und kleiner x . Für F_2^b stellt dies die erste Messung in diesem kinematischen Bereich dar. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den theoretischen Erwartungen der QCD überein.

In einer weiteren Analyse, die sich mit der Produktion von schweren Quarks beschäftigt, wurden Beauty-Ereignisse selektiert, indem Myonen von semileptonischen Zerfällen rekonstruiert wurden. Des Weiteren wurden im Bereich der tief-inelastischen Streuung (DIS, $2 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$) ein Jet und im Bereich der Photoproduktion (γp , $Q^2 \simeq 0$) zwei Jets im Ereignis verlangt. Um eine gegebene Reaktion störungstheoretisch innerhalb der QCD behandeln zu können, ist mindestens eine harte Skala im Prozess erforderlich. Für die Beauty-Produktion ist dies allein schon durch die hohe Masse des b-Quarks von ca. 5 GeV gewährleistet. Interessante Fragestellungen ergeben sich, wenn mehrere harte Skalen in einem Prozess auftreten. In einer Analyse konnte nun unter anderem untersucht werden, wie der Übergang vom Bereich der Photoproduktion zum Bereich der tief-inelastischen Streuung, in dem Q^2 als zusätzliche harte Skala auftritt, theoretisch beschrieben wird. Es wird erwartet, dass in dem untersuchten Bereich nicht zu großer Q^2 perturbative Rechnungen, die im so genannten *massiven Schema* in nächstführender Ordnung der QCD durchgeführt werden, zuverlässige Resultate geben sollten. In diesem Schema nehmen nur die leichten Quarks (u, d und s) als aktive Bestandteile von Proton bzw. Photon an der Wechselwirkung teil, während c- und b-Quarks lediglich dynamisch im Prozess der harten Streuung erzeugt

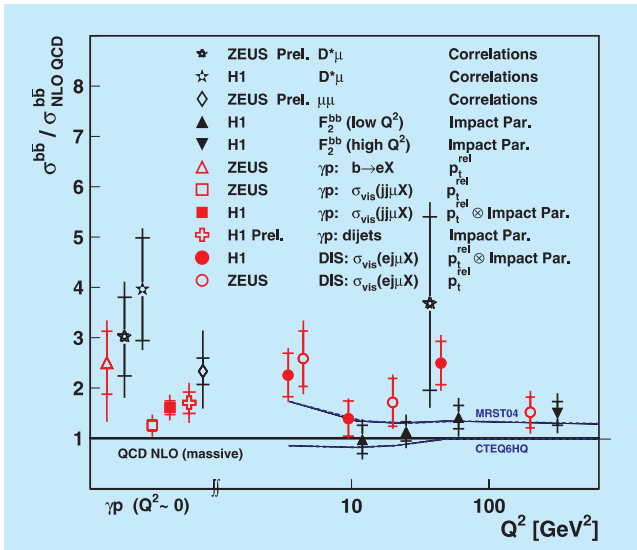


Abbildung 18: Verhältnis gemessener Beauty Erzeugungsquerschnitte zu NLO QCD Vorhersagen für eine Reihe von HERA Messungen als Funktion von Q^2 .

werden. Um Beauty-Ereignisse vom Untergrund aus leichten Quarks und Charm zu separieren, wurden in dieser Arbeit zum ersten Mal zwei Variablen kombiniert, die sowohl die große Masse des b-Quarks als auch dessen lange Lebensdauer ausnutzen. Für eine gute Trennung von Signal und Untergrund ist hier die hervorragende Positionsauflösung des CST von ca. $35 \mu\text{m}$ entscheidend. Abbildung 18 zeigt das Verhältnis von gemessenem Beauty-Wirkungsquerschnitt zu den NLO QCD Vorhersagen für diese und andere Messungen bei HERA als Funktion von Q^2 , wobei auffällt, dass alle bisherigen Beauty-Messungen konsistent etwas oberhalb der theoretischen Vorhersagen liegen.

Physik jenseits des Standardmodells

Der Elektron-Proton Collider HERA bietet wegen der hohen Strahlenergien und der Klarheit der Streueignisse ausgezeichnete Möglichkeiten, nach neuartigen Teilchen zu suchen, deren Existenz in Theorien jenseits des Standardmodells vorhergesagt wird. Wegen der besonders hohen Sensitivität für die Erzeugung der

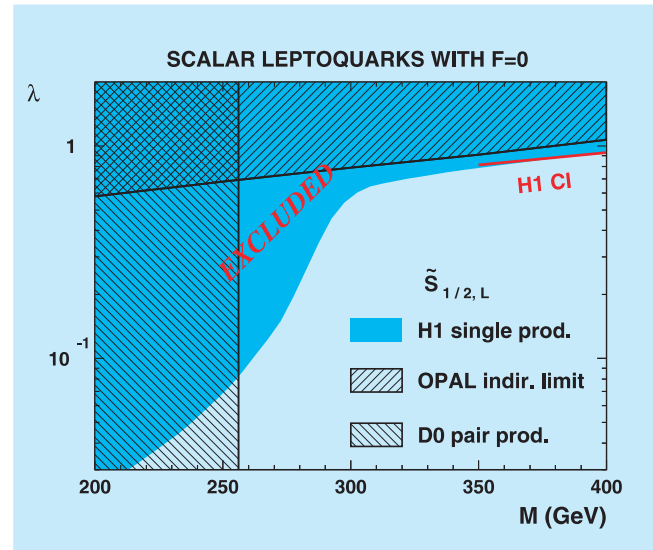


Abbildung 19: Ausschlussgrenzen für die Kopplungsstärke an skalare Leptoquarks λ als Funktion ihrer Masse im Vergleich zu den Ergebnissen von D0 und OPAL.

hypothetischen Leptoquarks wurden in der Vergangenheit bei HERA wiederholt Arbeiten zu diesem Thema veröffentlicht. In einer neuen Veröffentlichung wurden nun die gesamten HERA I-Daten von H1, die einer Luminosität von ca. 120 pb^{-1} entsprechen, mit Hilfe einer neuartigen statistischen Methode analysiert, welche die Empfindlichkeit für diese Suche verbessert. Die Suche geschieht unter der Annahme, dass die in der Kollision entstandenen Leptoquarks entweder wieder in ein Elektron (Positron) und ein Quark oder in ein Neutrino und ein Quark zerfallen. Insgesamt wurde nach 14 verschiedenen Typen von Leptoquarks gesucht. Je nach Typ liefern dabei die e^-p oder die e^+p -Daten größere Empfindlichkeit. Da auch in dieser Analyse keine Evidenz für die Existenz von Leptoquarks gefunden werden konnte, wurden obere Grenzen für die Kopplungsstärke an die untersuchten Leptoquarks als Funktion ihrer Masse abgeleitet. Abbildung 19 zeigt beispielhaft die sich ergebenden Ausschlussgrenzen für skalare Leptoquarks im Vergleich zu den ausgeschlossenen Regionen von Experimenten am LEP und am TEVATRON, die durch die vorliegende Analyse für Massen ab ca. 255 GeV zum Teil deutlich weiter eingeschränkt werden konnten.

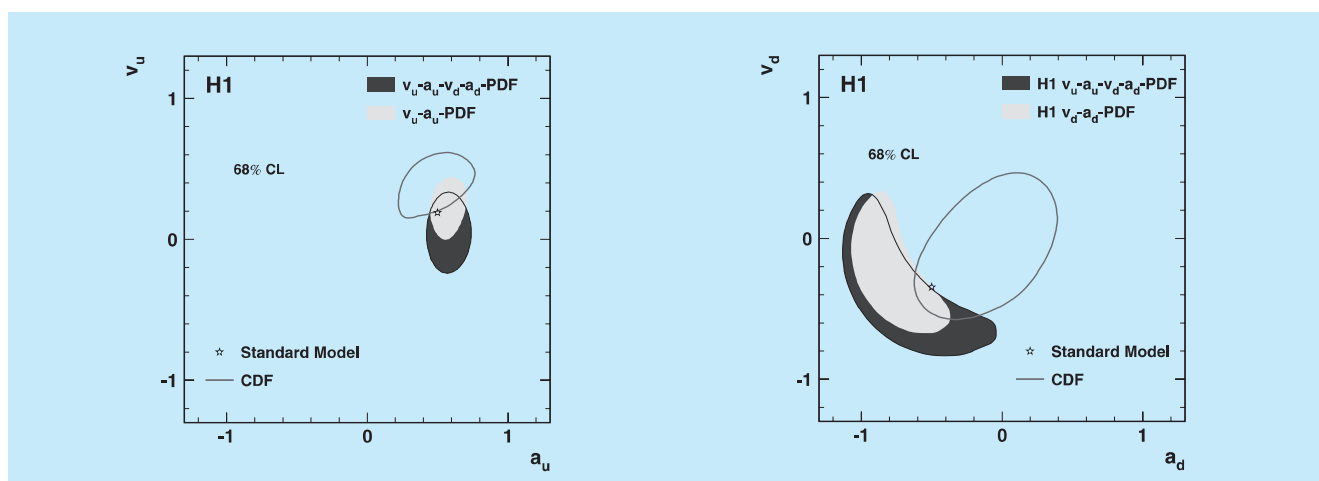


Abbildung 20: Vektor- und Axialvektorkopplungen von u - (links) und d -Quarks (rechts) an das Z Boson. Dargestellt sind die Resultate von H1 im Vergleich mit Ergebnissen der CDF Kollaboration und der Vorhersage des Standardmodells.

Elektroschwache Physik

HERA ist neben LEP/SLC (e^+e^-) und dem Tevatron ($p\bar{p}$) die einzige Beschleunigeranlage, in der bei Energien nahe der Fermiskala von ~ 100 GeV die elektroschwache Wechselwirkung der elementaren Fermionen (Quarks und Leptonen) untersucht wird. Im Bereich so hoher Energien sind die Auswirkungen der schwachen Wechselwirkung gegenüber der elektromagnetischen Wechselwirkung erheblich. Dies ist erkennbar an den messbar großen Beiträgen des Austauschs von geladenen W^\pm Bosonen, in den *charged current reactions* (CC) $e^-p \rightarrow \nu X, e^+p \rightarrow \bar{\nu} X$, mit deren Hilfe flavourabhängige Quarkverteilungen im Proton gemessen werden können. Dies ist ebenso erkennbar an der Zunahme des Austauschs des neutralen Z Bosons (*neutral current reaction* (NC) $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$) relativ zum Photonaustausch. Bei Impulsüberträgen $Q^2 \simeq 2\pi\alpha/G_F \sim M_{W,Z}^2 \sim 10^4 \text{ GeV}^2$ sind die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung etwa gleich groß. Diese Vorhersagen des Standardmodells wurden bei HERA schon in der Vergangenheit qualitativ eindrucksvoll bestätigt. In einer neuen Publikation wurden die ersten signifikanten Tests der elektroschwachen Theorie mit HERA-Daten durchgeführt. LEP wird in der Regel als die eigentliche Präzisions-

maschine zum Test der elektroschwachen Theorie bei hohen Energien angesehen, zumindest für den Leptonsektor. Für HERA, eine ep Maschine, kann das nur dann gelten, wenn gleichzeitig auch die Effekte der starken Wechselwirkung beherrscht werden. Die akkurate Messung sowohl der inklusiven CC- als auch der NC-Streuquerschnitte erlaubt es, die Partonverteilungen der Quarks (Up und Down), der Antiquarks sowie des Gluons allein mit Daten des H1-Experiments zu bestimmen. Darüberhinaus wurde es nun erstmalig möglich, gleichzeitig einen vollständigen Satz von elektroschwachen Parametern bei HERA zu messen: Abbildung 20 zeigt die erste Messung der schwachen Kopplungsparameter der leichten Quarks an das Z Boson. Neben der Bestimmung der *light quark couplings* wurden weitere Messungen fundamentaler Parameter möglich, so des Mischungswinkels $\sin^2\theta_W$ der $SU(2)_L \times U(1)$ Theorie, der Propagatormasse der schwachen Wechselwirkung oder auch eine interessante Abschätzung der Masse des Top-Quarks aus radiativen Korrekturen. Diese Resultate beruhen noch auf einer relativ geringen Datenmenge, insbesondere für die e^-p Streuung. Die mit HERA II aufgenommenen Daten in polarisierter $e^\pm p$ Streuung (NC und CC) werden es erlauben, diese Messungen noch wesentlich genauer durchzuführen.