

Abbildung 11: Synchrotronstrahlungsabsorber von ZEUS, der 80 cm vom Wechselwirkungspunkt in Leptonstrahlrichtung montiert ist. Der Absorber besteht aus einer Wolframlegierung, die auf der der reflektierten Synchrotronstrahlung zugewandten Flächen mit Silber und Kupfer beschichtet ist um Rückstreuung zu unterdrücken. Der eigentliche, 5 mm dicke Absorber sitzt in der Mitte. Er ist umgeben von einem von 10 cm langen, 2 mm dicken Schild zur Absorption niederenergetischer mehrfach reflektierter Photonen.

ZEUS Experiment

Beteiligte Institute: Univ. of the Aegean, Inst. Phys. Technol. Almaty, NIKHEF und Univ. Amsterdam, ANL Argonne, Andrews Univ. Berrien Springs, Univ. und INFN Bologna, Univ. Bonn, Univ. Bristol, RAL Chilton, Ohio State Univ. Columbus, Univ. della Calabrie und INFN Cosenza, Acad. of Mining and Metallurgy, Inst. of Nucl. Physics und Jagellonian Univ. Cracow, Univ. und INFN Firenze, Univ. Freiburg, Univ. Glasgow, DESY und Univ. Hamburg, Columbia Univ. Irvington, FZJ Jülich, Chonnam Nat. Univ. Kwangju, Imperial Coll. und Univ. Coll. London, Univ. Cathol. de Louvain, Univ. of Wisconsin Madison, Univ. Autonoma Madrid, McGill Univ. Montreal, Engin. Phys. Inst. und State Univ. Moscow, Yale Univ. New Haven, York Univ. North York, Oxford Univ., Univ. und INFN Padova, Weizmann Inst. Rehovot, Univ. La Sapienza und INFN Roma, Polytech. Univ. Sagamihara, Univ. of California Santa Cruz, Ewha Womans Univ. Seoul, Univ.-GH Siegen, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. Toronto, KEK Tsukuba, Pennsylvania State Univ. University Park, Inst. of Nucl. Stud. und Univ. Warsaw, Meiji Gakuin Univ. Yokohama, DESY Zeuthen.

Sprecher: R. Yoshida, Argonne Natl. Lab, USA

In den ersten beiden Monaten des Berichtsjahres führte HERA einen routinemäßigen Datennahetrieb mit geringen Strahlströmen durch. Diese Daten wurden im Wesentlichen zur Präzisierung des Verständnisses des Strahlungsuntergrundes verwendet, der im Jahr 2002 einen Betrieb bei nominalen Strahlströmen verhindert hat.

Von März bis Juli wurde der Strahlbetrieb unterbrochen, um die Synchrotronstrahlungsabsorber in der Wechselwirkungszone auszutauschen und Verbesserungen am Vakuumsystem von HERA vorzunehmen. Die Untersuchungen des Jahres 2002 hatten ergeben, dass die Absorber die zentrale Driftkammer nicht optimal gegen strahlabwärts reflektierte Synchrotronstrahlung schützen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Jahres 2002 sowie der Entwurf der neuen Absorber wurden im Januar abschließend von einem internationalen Komitee begutachtet. Auf Empfehlung des Komitees wurde der Strahlbetrieb im März unterbrochen und der vorgeschlagene Umbau der Absorber durchgeführt. Gleichzeitig wurden einige Reparaturen am

Detektor vorgenommen. Insbesondere wurde der Straw-Tube-Tracker des Vorwärtsdetektors repariert und verbessert.

Im August lief HERA wieder an. Es konnte schnell gezeigt werden, dass reflektierte Synchrotronstrahlung nicht mehr signifikant zum Untergrund in der zentralen Driftkammer beiträgt. Damit war der Umbau der Absorber erfolgreich. Durch Verbesserungen des Vakuumsystems von HERA hat auch der Protonuntergrund stark abgenommen. Extrapolationen des gemessenen Untergrundes lassen erwarten, dass ZEUS beim maximalen Protonstrom von 100 mA und einem Positronstrom von 50 mA Daten nehmen können wird.

Seit Mitte Oktober führt HERA wieder normalen Luminositätsbetrieb mit langsam steigenden Strahlströmen durch. Bis zum Ende des Berichtsjahres wurden Strahlströme von etwa 60 mA Protonen und 30 mA Positronen erreicht. Die integrierte von HERA gelieferte Luminosität beträgt etwa 2.5 pb^{-1} .

Wissenschaftlich war der Berichtszeitraum wieder sehr fruchtbar. Die ZEUS-Kollaboration hat 16 Ver-

öffentlichungen mit den bis zum Herbst 2000 genommenen Daten verfasst. Einige der Resultate werden in diesem Bericht vorgestellt und diskutiert.

ZEUS Betrieb

Im Jahr 2002 stellte sich heraus, dass nach dem HERA Umbau ein Betrieb mit hohen Strahlströmen und hoher Luminosität wegen zu hohen Strahlungsuntergrundes nicht möglich war. Die Hauptquellen des Untergrundes waren Synchrotronstrahlung, Positron-Restgas-Wechselwirkungen und Proton-Restgas-Wechselwirkungen. Ende 2002 wurde eine Begutachtung der bis dahin erfolgten Untergrundstudien bei HERA durch eine international besetzte Expertenkommission eingeleitet. Im Januar des Berichtsjahres wurde dieser Begutachtungsprozess abgeschlossen. Dabei wurde von ZEUS vorgeschlagen das System von Kollimatoren, das zwischen 80 cm und 140 cm vom Wechselwirkungspunkt in Leptonstrahlrichtung montiert ist, zu modifizieren. Diese Kollimatoren schützen den Detektor vor Synchrotronstrahlung, die 11 m strahlabwärts vom Hauptabsorber reflektiert wird. Mittels detaillierter Simulationen wurde das bestehende Kollimatorensystem so verbessert, dass zum einen die zentrale Driftkammer optimal gegen Synchrotronstrahlung abgeschattet wird und zum anderen das im Strahl befindliche Material minimiert wird. Auf diese Weise wird der Untergrund durch strahlauflwärts an Restgas-Molekülen gestreute Protonen verringert, für die der Absorber ein Target darstellt.

Abbildung 11 zeigt den bei 80 cm ins Strahlrohr eingebauten Kollimator. Der Untergrund durch Strahl-Restgas-Wechselwirkungen sollte durch Verbesserungen an den Vakuumsystemen von HERA verringert werden. Die Expertenkommission empfahl diese Vorschläge zur Durchführung. Daraufhin wurde im März der Strahlbetrieb unterbrochen. Der Zugang zu den Kollimatoren im Strahlrohr ist sehr schwierig und erfordert die vollständige Entkabelung des rückwärtigen Kalorimeters.

Um die strahlungsfreie Zeit optimal zu nutzen wurden gleichzeitig Reparaturarbeiten an verschiedenen Detektorkomponenten vorgenommen. Dazu gehörten das Kalorimeter, der Hadron-Elektron-Separator, das Backing-Kalorimeter sowie der 6 m-Tagger des

Luminositätssystems, der durch eine undichte Kühlleitung schwer beschädigt worden war. Die größte und schwierigste Reparatur am Detektor betraf die Spurkammern in Vorwärtsrichtung, die vollständig ausgebaut und zerlegt werden mussten. Für den Ausbau der Spurkammern musste auch das vorwärtige Kalorimeter vollständig entkabelt und auf Verlängerungsschienen vom Zentraldetektor entfernt werden.

Die Spurkammern in Vorwärtsrichtung bestehen aus Driftkammern sowie einem Straw-Tube-Tracker (STT). Der STT besteht aus zwei Modulen mit je 24 Sektoren, die je drei Lagen Straw Tubes enthalten.

Der STT wurde gebaut, um die Spurrekonstruktion geladener Teilchen in Vorwärtsrichtung (Protonrichtung) deutlich zu verbessern. Der Detektor wurde im Jahr 2001 fertig gestellt und in den ZEUS-Detektor integriert.

Bei Testmessungen und der Datennahme im Jahre 2002 wurden Probleme mit dem installierten Straw-Tube-Tracker festgestellt. Um die volle Leistungsfähigkeit des STT zu erreichen mussten folgende Reparaturen und Modifikationen am Detektor und der zugehörigen Frontend-Elektronik vorgenommen werden: auf insgesamt 22 von 120 Kabel-Treiber-Karten waren Sicherungen durchgebrannt. Diese Sicherungen wurden von den Frontend-Karten auf eine von außen zugängliche Stelle am Detektor verlegt. Gleichzeitig wurden je zwei Tantal-Kondensatoren ersetzt, die bei der Massenanfertigung mit der falschen Orientierung eingelötet worden waren.

Durch hohe Signalpegel in den Flachbandkabeln zwischen Frontend-Karte und Treiber-Karte wurden sehr viele Signale durch Übersprechen (Crosstalk) zwischen STT-Sektoren untereinander, aber auch zwischen STT und den Vorwärtsdriftkammern aufgezeichnet. Um die Datenmengen zu reduzieren, musste der STT mit einer hohen Schwelle betrieben werden, die die Effizienz stark beeinträchtigte. Die ursprünglich benutzte differentielle TTL-Technologie wurde durch LVDS-Technologie ersetzt, die zusätzlich das übertragene Signal abschwächt.

Die Arbeiten wurden von den Mitarbeitern der Institute in Bonn (D), Freiburg (D), Argonne (USA), Mos-

kau/MEPhi (RUS), DESY (D), Krakau (PL), Madrid (E), Tel Aviv (IL) und York (CDN) durchgeführt.

Bei der anschließenden Inbetriebnahme und während der regulären Datennahme mit dem ZEUS-Detektor wurde die Leistungsfähigkeit des optimierten STT getestet und gemessen. Alle erneuerten Komponenten arbeiten wie erwartet. Anzeichen für Übersprechen konnten nicht mehr gefunden werden. Die Signalschwelle kann jetzt auf einen Teststrahlbedingungen entsprechenden Wert gesetzt werden.

Weiterhin wurde der Straw-Tube-Tracker in das ZEUS-Triggersystem integriert. Er trägt mit rekonstruierten Spurstücken und mit berechneten Vertexvoraussagen sowohl zum Global-Track-Trigger (GTT) als auch zur dritten Triggerstufe (TLT) bei.

Fortschritte wurden auch bei der Offline-Software gemacht. Die im STT rekonstruierten Spurstücke sind Bestandteil der ZEUS Spurrekonstruktion.

Im August begann HERA wieder mit Strahlbetrieb. Zunächst wurde die Maschine eingefahren und das Vakuum mit möglichst großen Strömen konditioniert. Seit Oktober wird HERA mit ständig ansteigenden Strömen im normalen Luminositätsbetrieb gefahren. Um die Luminosität zu optimieren wird HERA dabei bisher nur mit 120 Bunchen betrieben. Von Anfang November bis Mitte Dezember musste der Protonstrom wegen technischer Probleme auf etwa 20 mA begrenzt bleiben. Zum Ende des Jahres wurden Ströme von 60 mA Protonen und 30mA Positronen erreicht. Die Polarisation erreichte Werte von etwas über 40%.

Schon kurz nach dem Wiederanlauf wurde klar, dass reflektierte Synchrotronstrahlung bei ZEUS nicht mehr signifikant zum Untergrund beiträgt und dass das neue Kollimatorsystem den Detektor wie geplant abschirmt. Der Protonuntergrund verbesserte sich ebenfalls schnell mit zunehmender Vakuumkonditionierung. Extrapolationen des gemessenen Stromes in der zentralen Driftkammer zeigen, dass ZEUS seit Mitte Dezember bei nominalen Strahlströmen die Kammer sicher betreiben könnte. Von Oktober bis Dezember hat HERA eine Luminosität von etwa 2.5 pb^{-1} geliefert, von der ZEUS etwa 50% mit eingeschalteter Hochspannung der zentralen Driftkammer aufgezeichnet hat.

Datenverarbeitung

Um den gestiegenen Anforderungen durch den HERA-Luminositätsupgrade und das leistungsfähigere Spurdetektorsystem gerecht zu werden, wurde eine neue Rekonstruktionsfarm mit 50 leistungsstarken Prozessoren in Betrieb genommen, die auf eine Produktionsrate von mehr als einer Million Wechselwirkungen pro Tag ausgelegt ist. Zur Automatisierung dieser Produktion wurde ein neues datenbankgetriebenes Schedulersystem entwickelt, welches den integrierten Betrieb von Rekonstruktions- und Analysefarmen ermöglicht. Dabei können auch mehrere Rekonstruktionsserien parallel betrieben werden, einschließlich einer Expressverarbeitung zur sofortigen Kontrolle gerade genomener Daten. Die Rechenzeit der Rekonstruktion pro Ereignis konnte durch gezielte Verbesserungen im Code um mehr als 40% gesenkt werden. Die weltweit verteilte Produktion simulierter Teilchenkollisionen mit dem „Funnel“-System erreichte im Jahr 2003 einen neuen Rekord von 290 Millionen Ereignissen. Dieses System ist bei ZEUS seit 1994 im Einsatz und kann als Vorläufer des „Grid“ angesehen werden. Parallel dazu wurde ein auf der EDG/LCG-Software beruhendes Grid-Testbett aufgebaut, das für erste Studien zur Simulation von Ereignissen auf dem Grid verwendet wird.

Die Struktur der objektorientierten Meta-Datenbank ZES, welche auf Objectivity 7.1 beruht, wurde durch so genannte Micro-Events ergänzt, wodurch die Selektion physikalischer Ereignissignaturen noch einmal erheblich beschleunigt wurde. Darüber hinaus wurde ZES an die Anforderungen des neuen Client/Server Event-Displays angepasst.

Die Leistungsdaten des gesamten Rechnersystems werden durch das neu eingeführte Monitorsystem „Ganglia“ laufend erfasst. Die Computingstrategie des ZEUS-Experiments wurde evaluiert und der technischen Entwicklung sowie den Erfordernissen der nächsten drei Jahre entsprechend angepasst.

Physikalische Ergebnisse

Die ZEUS-Kollaboration hat sich im Berichtsjahr auf die Veröffentlichung von wissenschaftlichen Ergebnis-

sen konzentriert, die auf einem großen Teil aller verfügbarer Daten aus den Jahren 1994–2000 basieren. Der vollständige verfügbare Datensatz entspricht einer integrierten Luminosität von etwa 130 pb^{-1} und umfasst 200 Millionen registrierte Streueignisse. Allerdings sind diese Streueignisse nicht mit identischen Beschleunigerparametern bzw. Detektorkonfigurationen aufgezeichnet worden. Daher wurden abhängig von Details der Studien die jeweils passenden Teile des Datensatzes verwendet. Viele dieser Studien und Analysen wurden von ZEUS Mitarbeitern auf Konferenzen vorgestellt und diskutiert. Insgesamt wurden 16 Ergebnisse dieser Datenanalysen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert. Im Folgenden werden diese Ergebnisse zusammengefasst.

Auf der Suche nach Abweichungen vom Standardmodell

Das so genannte „Standardmodell der Teilchenphysik“ liefert eine konsistente Beschreibung der mikroskopischen Phänomene im Rahmen der Quantentheorie und beschreibt drei der vier bekannten Wechselwirkungen, nämlich den Elektromagnetismus, die Schwache und die Starke Kraft. Dieses Modell hat viele Eigenschaften, die darauf hindeuten, dass es sich dabei nur um eine unvollständige Beschreibung der mikroskopischen Phänomene handelt und dass irgendwann eine vollständigere Theorie an seine Stelle treten wird, die dann auch die vierte Kraft, nämlich die Gravitation, mit umfasst. Außerdem erhoffen sich die Wissenschaftler, dass diese vollständige Theorie eine natürliche Erklärung liefert für die Werte von etwa 20 Parametern, die vom gegenwärtigen Standardmodell als gegeben angenommen werden müssen. Ein Beispiel ist das riesige Massenspektrum der bekannten Elementarteilchen, das vom Wert Null für das Photon fast bis zur Masse eines Goldatoms reicht.

Eine Hoffnung, auf diesem Weg voran zu kommen beruht darauf, Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells zu beobachten und aus diesen Abweichungen auf die Eigenschaften der vollständigen Theorie zu schließen. In seinen Grundzügen ist das Standardmodell seit etwa 25 Jahren bekannt und seine Vorhersagen sind seitdem mit zunehmender Präzision überprüft worden. Die Entdeckung der endlichen Masse der Neutrinos ist die einzige signifikante Abweichung

die bisher beobachtet werden konnte. Das Wort „signifikant“ in diesem Zusammenhang bedeutet, dass sich die Beobachtung nicht als „Ausreißer“ (oder Fluktuation) einer Messung interpretieren lässt.

Produktion einzelner top-Quarks

Es gibt sehr unterschiedliche Methoden, auf die Spur derartiger Abweichungen zu gelangen. Ein möglicher Weg ist die Suche nach Streueignissen, die im Standardmodell gar nicht oder nur so selten vorkommen, dass man sie bei HERA nicht beobachten sollte. Ein Beispiel hierfür ist die Erzeugung einzelner top (t) Quarks. Das t-Quark ist das schwerste aller bekannten Quarks mit einer Masse von fast $180 \text{ GeV}/c^2$. Das entspricht etwa der Masse eines Goldatoms. Top-Quarks wurden 1995 am Fermilab in Chicago zum ersten Mal beobachtet. Dort werden sie in Kollisionen von Protonen und Antiprotonen jeweils paarweise erzeugt. Insgesamt weniger als zweihundert t-Quarks sind bisher dort erzeugt worden und an keinem anderen Beschleuniger sonst können zur Zeit diese Quarks nachgewiesen werden.

Bei HERA können t-Quarks aufgrund von Energieerhaltung nur einzeln erzeugt werden, wie schematisch in Abbildung 12 dargestellt ist. Das Elektron oder Positron (in Abbildung 12 mit „e“ gekennzeichnet) kollidiert unter Aussendung eines Photons oder Z^0 -Bosons mit einem u-Quark aus dem Proton (mit „u“ gekennzeichnet) und wandelt sich dabei in ein top-Quark um. Das auslaufende t-Quark zerfällt unmittelbar unter Aussendung eines schweren W-Bosons in ein leichteres b-Quark. Diesen Prozess bezeichnet man als „Flavour Changing Neutral Current“ (FCNC). Der FCNC Prozess ist im Standardmodell extrem selten. Er tritt allerdings in spekulativen Alternativmodellen häufiger auf.

Präziser ausgedrückt sagt das Standardmodell voraus, dass im vollen HERA Datensatz mit keinem einzigen t-Quark zu rechnen ist. Das heißt, dass bereits die zweifelsfreie Beobachtung eines einzelnen t-Quarks über einem entsprechend genau bekannten Untergrund die erhoffte Abweichung von der Vorhersage des Standardmodells bedeuten würde.

Auf der Suche nach t-Quarks wurde der gesamte verfügbare Datensatz mit mehr als 170 Millionen Streueignissen durchsucht. Dabei werden unterschiedliche

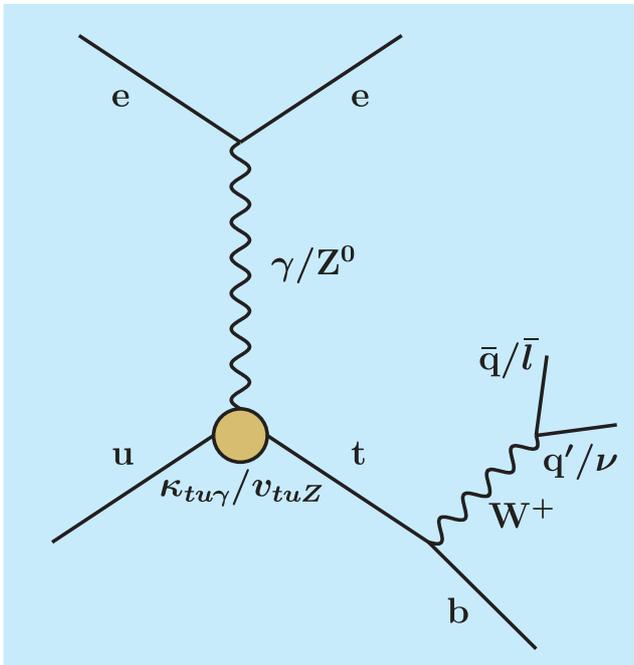


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Produktionsprozesses von top-Quarks bei HERA.

Zerfallsketten des t-Quarks berücksichtigt: Zunächst sucht man nach dem so genannten leptonicen Zerfall des schweren W-Bosons in ein Elektron oder Myon und das entsprechende Anti-Neutrino. In diesen Ereignissen wird ein hochenergetisches Elektron oder Myon nachgewiesen zusammen mit fehlendem Transversalimpuls, den das (unsichtbare) Anti-Neutrino davongetragen hat. Wird verlangt, dass der fehlende Transversalimpuls mindestens 40 GeV/c beträgt, dann findet sich kein einziges solches Ereignis in den Daten. Der verbleibende Untergrund aufgrund von Prozessen des Standardmodells beträgt ungefähr ein Ereignis. Mit der angewandten Methode würde ein t-Quark mit 7% Wahrscheinlichkeit in der entsprechenden Zerfallskette identifiziert werden.

Des Weiteren sucht man auch nach hadronischen Zerfällen des schweren W-Bosons. Das bedeutet, dass das W-Boson in zwei Quarks zerfällt, die wiederum als Teilchenjets im Detektor sichtbar werden. In diesem Fall erwartet man keine fehlende Transversalenergie, aber drei hochenergetische Teilchenjets. Die Kombination von zwei dieser Jets muss die Masse des W-Bosons (ca. 80 GeV/c²) und die Kombination aller drei Jets

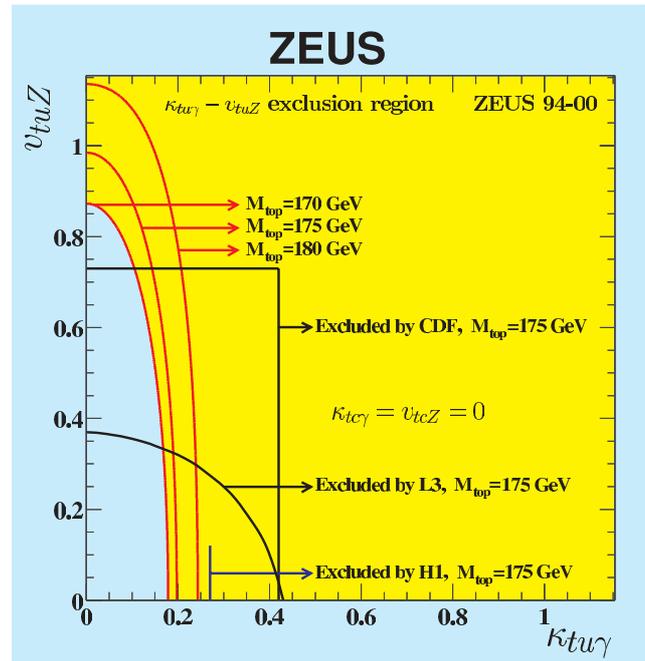


Abbildung 13: Grenzwerte für die Kopplungen des FCNC Prozesses, die mit den Beobachtungen mit 95% Wahrscheinlichkeit verträglich sind.

die Masse des t-Quarks ergeben. Werden die Massen der entsprechenden Jet Kombination gemäß dieser Bedingungen eingeschränkt, verbleiben 14 Ereignisse bei einer Erwartung aus Untergrundprozessen von 18 Ereignissen. Mit der angewandten Methode würde ein t-Quark mit 17% Wahrscheinlichkeit in diesem Zerfallskanal identifiziert. Man findet hier also wesentlich mehr Ereignisse bei einer allerdings entsprechend höheren Anzahl von Untergrundereignissen. Es findet sich auch hier kein Hinweis auf ein t-Quark.

Eine in der Hochenergiephysik übliche Methode, ein solches „negatives“ Resultat zu quantifizieren, ist die Angabe eines Grenzwertes für die „Stärke“ des Prozesses, die mit 95% Wahrscheinlichkeit damit statistisch verträglich ist, dass der Prozess nicht beobachtet wird, obwohl er eventuell mit dieser oder geringerer Stärke vorhanden ist. Auf diese Weise lassen sich die Ergebnisse verschiedener Experimente mit unterschiedlicher Empfindlichkeit vergleichen.

Abbildung 13 zeigt diese Grenzwerte für die Stärke des FCNC Prozesses bei Anwesenheit eines Photons ($\kappa_{tu\gamma}$) bzw. eines schweren Z-Bosons (ν_{tuZ}). Dabei bedeutet

der Wert 1, dass die Kopplung die gleiche Stärke wie die elektroschwache Wechselwirkung erreicht. Zum Vergleich sind in Abbildung 13 die Grenzwerte anderer Experimente gezeigt. Für kleine Werte von $\kappa_{\tau\mu\gamma}$ und $\nu_{\tau Z}$ (< 0.2) werden die Messungen von ZEUS von keinem anderen Experiment übertroffen.

Produktion einzelner τ -Leptonen

Die Suche nach einzelnen t-Quarks kann noch in einem weiteren Zerfallskanal erfolgen: Das schwere W-Boson in der leptonischen Zerfallskette $t \rightarrow bW \rightarrow b\nu$ kann anstatt in ein Elektron oder Myon auch in ein τ -Lepton und das entsprechende Neutrino zerfallen. Auf diese Weise kann man die Effizienz für den Nachweis einzelner t-Quarks steigern. Darüber hinaus ist der Nachweis eines einzelnen isolierten τ -Leptons in einem Streueignis ein recht allgemeiner Hinweis auf den Zerfall eines schweren Teilchens und daher sehr interessant. Unter anderem sagen verschiedene „Supersymmetrische“ Theorien den Zerfall des „stop“, des supersymmetrischen Partners des t-Quarks, in ein τ -Lepton vorher.

Der Nachweis von τ 's ist schwieriger als der von Elektronen oder Myonen, da das τ rasch zerfällt und typischerweise nicht direkt im Detektor gesehen wird. Man ist darauf angewiesen, die Zerfallsprodukte des τ zu rekonstruieren und so indirekt auf seine Anwesenheit zu schließen. Aus diesem Grund ist bei ZEUS ein dedizierter Nachweisalgorithmus für τ 's entwickelt worden, der die räumliche Verteilung der Zerfallsprodukte im ZEUS Kalorimeter ausnutzt. Die Zerfallsprodukte des τ bilden nämlich typischerweise einen Teilchen-Jet bestehend aus 1, 3 oder 5 Hadronen. Diese sind so stark gebündelt, dass sie als einzelnes Teilchen mit großer Eindringtiefe im Kalorimeter nachgewiesen werden. In der Praxis werden 6 unabhängige Observablen von stark kollimierten Teilchenjets zu einer so genannten τ -Diskriminante D kombiniert. Die τ -Diskriminante variiert zwischen 0 und 1. Dabei signalisiert ein Wert nahe bei 1 eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass ein τ gefunden wurde.

Abbildung 14(a) zeigt die Verteilung der Werte der Diskriminante für Ereignisse des geladenen Stroms. Diese Ereignisse enthalten kein τ , sind aber ansonsten den erwarteten τ Ereignissen ähnlich. Im Standardmodell erwartet man aus Zerfällen von schweren W-Bosonen

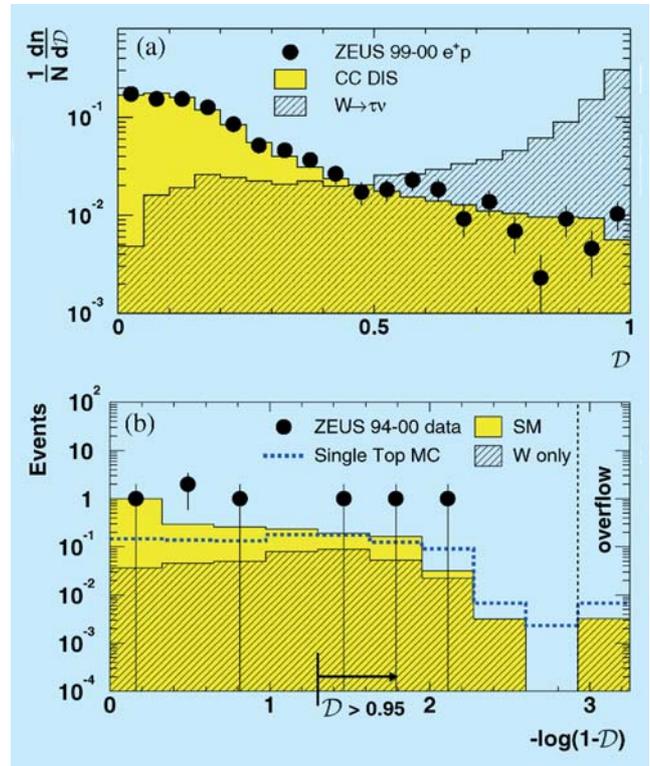


Abbildung 14: Verteilung der Werte der τ -Diskriminante für ZEUS Daten und für Simulationsergebnisse, einmal ausschließlich für den Prozess des Geladenen Stromes, in dem kein τ vorkommt, und für den Zerfall von schweren W-Bosonen in ein τ und das entsprechende Neutrino.

den größten Beitrag zur Rate von isolierten τ 's. Eine stark überhöhte Produktionsrate von τ 's anhand dieses Prozesses ist schraffiert in Abbildung 14(a) dargestellt. Abbildung 14(b) zeigt nun die tatsächliche Verteilung nach entsprechender Vorselektion der Daten. Für Werte von $D > 0.95$ verbleiben genau drei Ereignisse. Zwei dieser Ereignisse haben einen hadronischen Transversalimpuls $p_T^{\text{had}} > 25 \text{ GeV}/c$. In diesem Bereich erwartet man aus dem Standardmodell wesentlich weniger als ein Ereignis, nämlich 0.2 ± 0.05 . Die Wahrscheinlichkeit, dass das Standardmodell mit dieser Beobachtung verträglich ist beträgt 1.8%. Derartige Fluktuationen werden immer wieder beobachtet und man geht daher zunächst davon aus, dass kein Widerspruch der Daten zum Standardmodell vorliegt. Allerdings bedeutet eine solche Fluktuation auch, dass es besonders wichtig ist, dieses Phänomen mit höherer Statistik weiter zu untersuchen.

Leptoquarks

Das Standardmodell unterscheidet bei den fundamentalen Bestandteilen der Materie zwischen Leptonen und Baryonen. Das Elektron, zum Beispiel, ist ein Lepton, und Quarks sind Baryonen. Leptonen und Baryonen sind strikt voneinander getrennt und können sich nicht ineinander umwandeln. Das heißt, wenn vor einer Streureaktion ein Lepton vorhanden ist, dann muss auch danach noch eines da sein. Insbesondere gibt es im Standardmodell keine Teilchen, die sowohl Lepton- als auch Baryoneigenschaften tragen. Erweiterungen des Standardmodells hingegen oder gewisse supersymmetrische Theorien enthalten so genannte „Leptoquarks“. Das sind Hybriden, die sich sowohl wie ein Lepton als auch wie ein Baryon verhalten. HERA eignet sich besonders gut für die Suche nach Leptoquarks. Wenn die verfügbare Energie ausreicht, entsteht ein entsprechendes Leptoquark durch die Verschmelzung des Elektrons mit einem Quark aus dem Proton im so genannten S-Kanal. Man bezeichnet diesen Prozess als „Resonante Produktion“. Das erzeugte Leptoquark zerfällt zwar sofort wieder, jedoch beobachtete man zusätzlich zu Prozessen des Standardmodells eine Erhöhung der Ereignisrate bei für die Masse des Leptoquarks charakteristischen Streuparametern.

In den Daten der Jahre 1994–1996 waren zunächst Abweichungen des tiefunelastischen Streuquerschnitts von den Vorhersagen des Standardmodells bei höchsten Impulsübertragen beobachtet worden. Diese Beobachtung führte zu weitreichenden Spekulationen über die Existenz von Leptoquarks. Die verfügbaren Ereignisse waren allerdings nicht zahlreich genug um auszuschließen, dass es sich hierbei nur um einen statistischen Ausreißer gehandelt hatte. In der Tat verringerte sich die statistische Signifikanz der beobachteten Abweichungen durch Hinzunahme zusätzlicher Daten aus späteren Jahren. Im Berichtsjahr konnte schließlich das Ergebnis einer umfassenden Suche basierend auf allen verfügbaren Daten der Jahre 1994–2000 veröffentlicht werden. Die Suche wurde dabei speziell für Leptoquarks optimiert, die entweder in ein Elektron und Jets bzw. in ein Neutrino und Jets zerfallen. In der Massenverteilung des Elektron-Jet bzw. Neutrino-Jet Systems träte ein entsprechend zerfallendes Leptoquark als schmale resonanzartige Überhöhung auf. Man betrachtet darüber hinaus den Cosinus des Streuwinkels von Lepton und Jet im Schwerpunktssystem, $\cos \theta^*$. Reguläre tiefun-

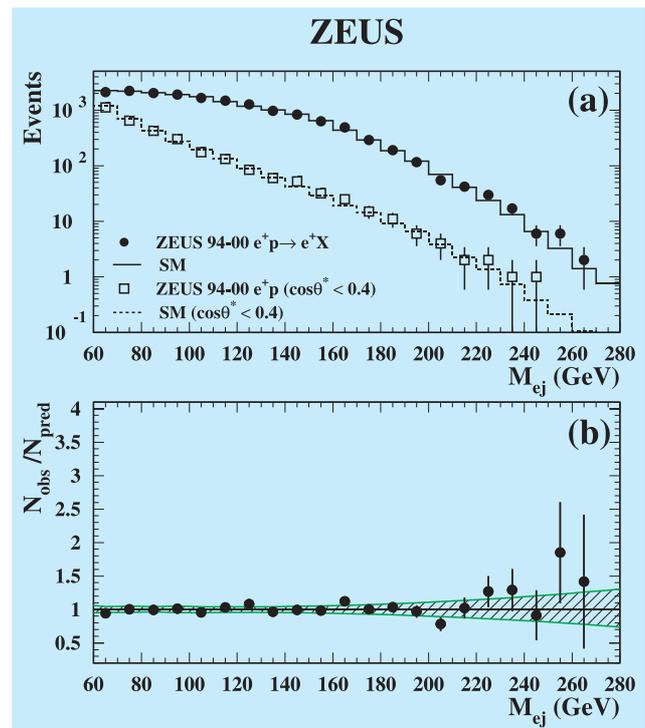


Abbildung 15: (a) Massenverteilung M_{ej} für den Prozess $e^+p \rightarrow e^+X$ mit und ohne Beschränkung von $\cos \theta^*$. (b) Anzahl der beobachteten geteilt durch die Anzahl der gemäß Standardmodell erwarteten Ereignisse.

elastische Streuung bevorzugt große Werte von $\cos \theta^*$, während beim Zerfall von Leptoquarks positive und negative Werte von $\cos \theta^*$ mit gleicher Häufigkeit auftreten. Wenn man verlangt, dass $\cos \theta^*$ kleiner als ein geeigneter Wert ist (in diesem Fall $\cos \theta^* < 0.4$), kann man ein eventuell vorhandenes Leptoquarksignal noch besser aus den Untergrundprozessen herausoperieren.

Abbildung 15(a) zeigt beispielhaft die Massenverteilung des Elektron-Jet Systems für den Prozess $e^+p \rightarrow e^+X$. Es ist keine Abweichung der beobachteten Ereignisrate von der Vorhersage des Standardmodells zu sehen. Noch deutlicher wird das in Abbildung 15(b), die den Quotienten der beobachteten und gemäß Standardmodell erwarteten Ereignisraten zeigt. Ähnliche Ergebnisse findet man für die Prozesse $e^-p \rightarrow e^-X$, $e^+p \rightarrow \nu X$ und $e^-p \rightarrow \nu X$.

Unter Annahme eines bestimmten „Leptoquark Szenarios“ kann man dieses „negative“ Ergebnis in Grenz-

werte für Massen und Kopplungen umrechnen, die mit den Beobachtungen „gerade noch“ (95% Confidence Level) verträglich sind. Legt man zum Beispiel das Modell von Buchmüller, Rückl und Wyler zugrunde, so kann man Grenzwerte für die Masse von Leptoquarks angeben, die durch diese Messung ausgeschlossen werden. Diese Massengrenzwerte liegen zwischen 250 und 390 GeV/c. In diesem Bereich ist die Existenz von Leptoquarks durch keine andere Messung, etwa am Tevatron in Chicago oder am LEP in Genf, ausgeschlossen.

Die faszinierende Welt im Innern des Protons

Seit der ersten Datennahme im Jahr 1992 haben die HERA-Experimente ein immer detaillierteres Bild von einem der wichtigsten Bausteine unserer Welt, dem Proton, geliefert. Dabei dringt das vom Elektron abgestrahlte virtuelle Photon tief ins Innere des Protons ein und liefert Bilder von Strukturen die kleiner sind als ein Tausendstel des Protonradius. Normalerweise kann man diese Untersuchungen nicht zerstörungsfrei vornehmen, denn wenn das Photon an einem Bestandteil des Protons gestreut wird, das eine starke Farbladung trägt, dann zerreißen die resultierenden starken Kräfte das Proton.

Eine herausragende Beobachtung bei ZEUS war es, dass bei einer erheblichen Anzahl von Streuprozessen, bei denen das Photon tief ins Innere des Protons eindringt, das Proton diesen Prozess unbeschadet übersteht. Das kann nur dadurch zustande kommen, dass die Wechselwirkung mit einem effektiv farblosen Bestandteil des Protons stattfindet. Wie diese Wechselwirkung im Einzelnen abläuft, ist noch nicht endgültig geklärt. Die HERA-Daten lassen es aber plausibel erscheinen, dass sie vorzugsweise an zwei Gluonen so stattfindet, dass deren Farbladungen sich gerade kompensieren. Man bezeichnet diesen Prozess in Anlehnung an ein optisches Analogon als „Diffraktive“ Streuung.

Eine vollständige quantitative Deutung der Diffraktiven Streuung steht noch aus. Deshalb ist es von eminenter Wichtigkeit, diesen Prozess in möglichst vielen Teilaspekten zu studieren. Zwei Veröffentlichungen waren im Berichtszeitraum diesen Themen gewidmet: Die erste befasst sich mit dem Beitrag von Charm

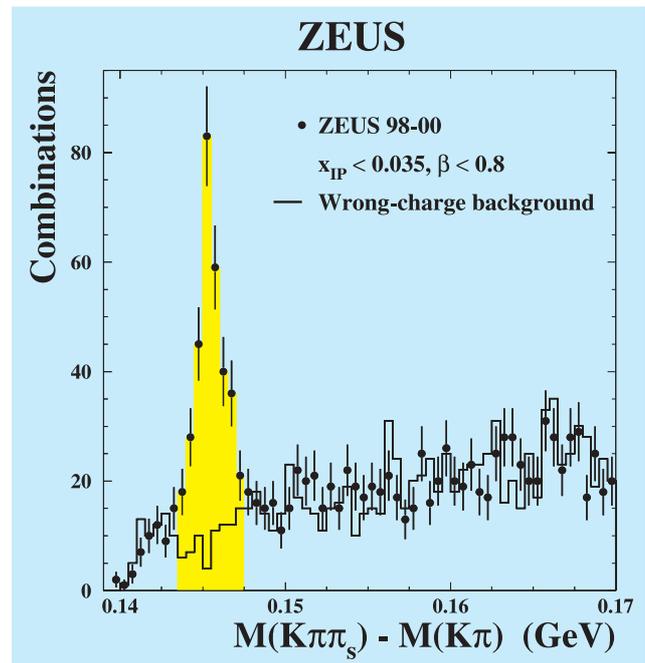


Abbildung 16: Verteilung der invarianten Massendifferenz von D^* und D^0 -Meson im Zerfallskanal $D^*(2010)^+ \rightarrow D^0\pi^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ (bzw. ladungskonjugiert) in Diffraktiver Streuung.

(c)-Quarks zur Diffraktiven Streuung. Hierbei rekonstruiert man zunächst ein D^* Meson im Zerfallskanal $D^*(2010)^+ \rightarrow D^0\pi^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ (bzw. ladungskonjugiert). Vom D^* , das aus einem c und einem u-Quark besteht, schließt man zurück auf das c-Quark im harten Streuprozess. Des Weiteren wählt man diffraktive Ereignisse, indem man zusätzlich eine große Rapiditätslücke zwischen dem in Vorwärtsrichtung auslaufenden Protonrest und den übrigen Hadronen verlangt. In den Daten der Jahre 1998 bis 2000 wurden auf diese Weise ca. 250 Ereignisse ausgewählt,

Abbildung 16 stellt diese Beobachtung eindrücklich dar. Sie zeigt die Massendifferenz von D^* und D^0 für diffraktive Ereignisse und enthält eine scharfe Resonanz bei ca. 0.13 GeV, die von D^* Mesonen stammt. So ist klar nachgewiesen, dass in der diffraktiven Streuung auch c-Quarks produziert werden. Der Anteil diffraktiv produzierter D^* -Mesonen an vollständig inklusiv produzierten D^* -Mesonen beträgt ca. 6%.

Wenn man von den Eigenschaften der D^* -Mesonen auf die Eigenschaften des ursprünglichen c-Quarks zu-

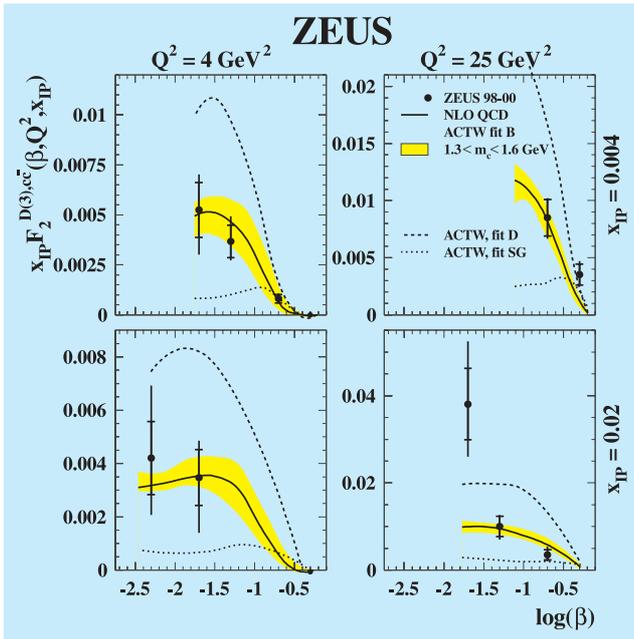


Abbildung 17: Die diffraktive Charm Strukturfunktion $F_2^{D(3),c\bar{c}}$.

rückrechnet, kann man ihren Anteil an der diffraktiven Strukturfunktion $F_2^{D(3),c\bar{c}}$ errechnen.

Dieser Anteil ist in Abbildung 17 in Form der Charm Strukturfunktion $F_2^{D(3),c\bar{c}}$ dargestellt.

Verschiedene Modelle versuchen die Produktion von c-Quarks in diffraktiver tiefunelastischer Elektron-Proton Streuung im Rahmen der QCD zu erklären. Eine Vorstellung ist, dass es im Proton ein „farbloses“ Teilchen, das Pomeron, gibt. In der tiefunelastischen Streuung strahlt das Proton das Pomeron ab. An diesem Pomeron, das aus einer farblosen Kombination von Quarks und Gluonen besteht, findet der harte Streuprozess statt. Das Proton überlebt unbeschadet. Man misst somit in der Diffraktiven Streuung die Partonstruktur des Pomerons, und $F_2^{D(3),c\bar{c}}(\beta)$ wird dort auch als die Strukturfunktion des Pomerons interpretiert. Der Parameter β ist dabei der Impulsanteil eines Partons im Pomeron. In Abbildung 17 ist zu erkennen, dass eine Rechnung basierend auf diesem Modell (ACTW) die Daten gut beschreibt, wenn ein gluonreiches Pomeron (fit B) angenommen wird. Andere Modelle betrachten die Quantenfluktuationen des virtuellen Photons in Quark-Antiquark Paare, unter anderem auch Charm.

Diese c-Quarks streuen dann an einem farblosen Zwei-Gluonsystem im Proton. Innerhalb der großen statistischen Fehler dieser Messung liefern auch diese Modelle eine gute Beschreibung der Daten.

Die zweite Publikation zum Themenbereich Diffraktive Streuung befasst sich mit der tiefunelastischen Comptonstreuung. Dieser Prozess trägt seinen Namen in Anlehnung an die von Sir A. H. Compton entdeckte Streuung von Licht an Elektronen. Dabei beobachtet man im Endzustand statt eines hadronischen Jets ein einzelnes Photon zusammen mit dem gestreuten Elektron. Dieser besonders einfache Endzustand ermöglicht tiefe Einblicke in die Mechanismen der diffraktiven Prozesse. Unter der Annahme, dass es sich bei diesem Prozess um den Austausch von zwei Gluonen handelt, kann man eine Rechnung in der perturbativen QCD ausführen und die Vorhersagen überprüfen. Darüberhinaus sollte es dann möglich sein so genannte „Generalisierte Partondichteverteilungen“ zu extrahieren, die Informationen über Korrelationen zwischen den Quarks im Proton enthalten.

Erste Resultate, in Abbildung 18 dargestellt, sind in der Tat ermutigend. Die Abbildung zeigt den Wirkungs-

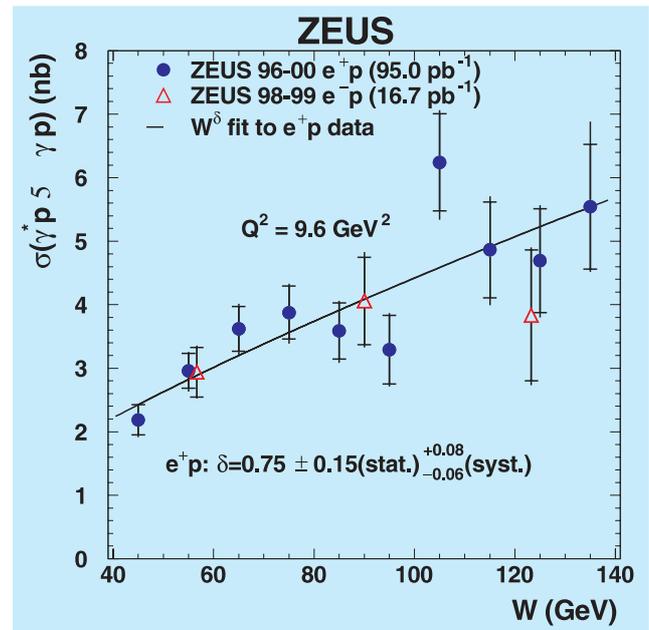


Abbildung 18: Der Wirkungsquerschnitt für tiefunelastische virtuelle Comptonstreuung, $\gamma^* p \rightarrow \gamma p$, als Funktion der Energie des γp Systems.

querschnitt für den Prozess $\gamma^*p \rightarrow \gamma p$ als Funktion der Energie des γ^*p Systems. Man erkennt, dass die Daten gut von einem einfachen Ansatz der Form W^δ beschrieben werden.

Wenn der Exponent δ separat für die e^+p und die e^-p Daten angepasst wird, ergeben sich respektive $\delta = 0.75 \pm 0.2$ und $\delta = 0.45 \pm 0.4$. Diese Ergebnisse sind miteinander kompatibel und entsprechen der Erwartung für einen harten Streuprozess, wie er auch schon im Prozess $ep \rightarrow J/\psi p$ gemessen wurde. Mit dieser Messung wurden die Grundlagen gelegt, auf denen in Zukunft mit der höheren Statistik der HERA II Daten und weiter verbesserten Analysemethoden eine Extraktion der Generalisierten Partondichten im Proton aufbauen kann.

Wie sieht „Nichts“ aus? Oder: Die Struktur des QCD Vakuums

Im Standardmodell der Teilchenphysik werden die Schwache und die Starke Wechselwirkung von nicht-Abelschen Eichtheorien beschrieben. Zusammen mit einer Abelschen Eichtheorie, der Quantenelektrodynamik, bilden diese Quantenfeldtheorien das Standardmodell der Teilchenphysik. Nicht-Abelsche Eichtheorien sagen eine Reihe von einzigartigen Phänomenen voraus, die in Abelschen Eichtheorien nicht vorkommen. Ein Beispiel ist die komplexe Struktur des quantenmechanischen Grundzustands der Theorie, des Vakuums. In jeder Quantentheorie ist das Vakuum ein komplexer Zustand, in dem ständig virtuelle Teilchenpaare entstehen und wieder vergehen. In nicht-Abelschen Eichtheorien gibt es darüber hinaus eine unendliche Anzahl unterschiedlicher Vakua, die energetisch äquivalent sind, sich aber „topologisch“ unterscheiden. Diese Vakua werden durch eine so genannte „Winding“-Zahl gekennzeichnet. Verschiedene Vakuumzustände sind durch eine Energiebarriere voneinander getrennt. Allerdings erlaubt die Quantentheorie Übergänge von einem in ein anderes Vakuum durch einen so genannten Tunnelprozess. Im Einklang mit der Heisenberg'schen Unschärferelation verletzt das System dabei für einen kurzen Zeitraum den Energieerhaltungssatz. Einen solchen Übergang von einem in ein anderes Vakuum bezeichnet man als „Instanton“. Instantonen sind sowohl zeitlich als auch räumlich lokalisiert. Die Existenz von

Instantonen in der QCD ist eine unvermeidliche Konsequenz der mathematischen Theorie. Allerdings ist kein Instanton bisher beobachtet worden. Der Nachweis eines Instantons wäre damit eine sehr fundamentale Beobachtung, die tiefe Einblicke in die mathematische Grundstruktur des Standardmodells erlaubt.

Das theoretische Verständnis der Eigenschaften von Instantonen hat in den letzten Jahren dank der Zusammenarbeit von Experimentalphysikern und theoretischen Physikern am DESY große Fortschritte gemacht, so dass man inzwischen recht verlässliche Vorhersagen über die konkreten beobachtbaren Eigenschaften von Instantonen machen kann. So erwartet man aus QCD-Rechnungen, dass Instantonen auf dem Niveau von bis zu 1% aller Ereignisse zum tiefunelastischen Streuquerschnitt bei HERA beitragen. Das bedeutet, dass in den verfügbaren ZEUS Daten bis zu einer Million Instantonen zu finden sein müssten. Es lohnt sich also, nach Instantonen bei HERA zu suchen. Die Herausforderung ist allerdings, Instantonereignisse zweifelsfrei von regulären tiefunelastischen Streueignissen zu unterscheiden.

Instantonen haben eine Reihe von spezifischen Eigenschaften, anhand derer man versucht, diese Ereignisse aus dem Rest der Ereignisse herauszufiltern. Leider sind uns bisher keine Kriterien bekannt, anhand derer man mit hoher Effizienz Instantonereignisse aus gewöhnlichen Ereignissen herausfiltern könnte. Ein wichtiger Schritt in diese Richtung wurde allerdings im Berichtszeitraum veröffentlicht. Dabei wurden sechs unterschiedliche Observablen des hadronischen Endzustands zu einer so genannten Fisher-Diskriminante kombiniert. Dies ist ein Weg das Verhältnis von Signal zu Untergrundeignissen zu optimieren.

Abbildung 19 zeigt die Verteilung der Fisher-Diskriminante t der vorselektierten Streueignisse. Die mit DJANGOH gekennzeichnete Verteilung zeigt die Erwartung für reguläre tiefunelastische Ereignisse, während die beiden mit „QCDINS“ gekennzeichneten Verteilungen die theoretische Erwartung für Instantonereignisse zeigen, und zwar einmal, gestrichelt, bei der erwarteten Rate und einmal, durchgezogen, bei einer stark überhöhten Rate. Man erkennt, dass nur bei großen Werten von t , zum Beispiel $t > 8$, ein über dem Untergrund von regulären Ereignissen sichtbarer Anteil von Instantonereignissen erwartet würde. Aber auch in diesem Bereich ist keine erkennbare Abweichung der

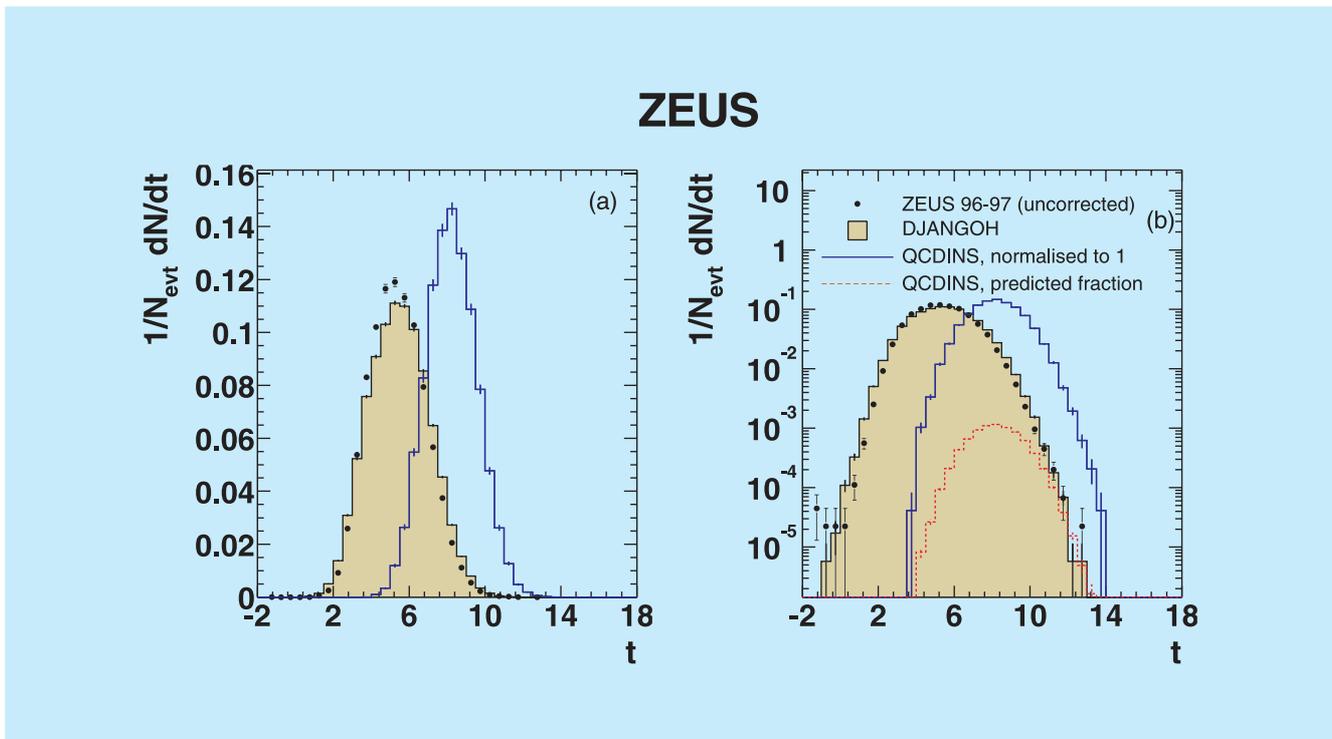


Abbildung 19: Fisher-Diskriminante für tiefunelastische Streueignisse nach einer Vorselektion, einmal auf einer linearen (a) und einmal auf einer logarithmischen Skala (b). Die Datenpunkte sind die Resultate der ZEUS-Messung. Die mit DJANGOH gekennzeichnete Verteilung zeigt die theoretische Erwartung für reguläre tiefunelastische Streueignisse. Die mit QCDINS gekennzeichneten Verteilungen stellen die Erwartungen für Instantonereignisse dar, und zwar einmal, gestrichelt, bei der theoretisch erwarteten Rate und einmal, durchgezogen, bei einer stark überhöhten Rate.

Daten von der Vorhersage für reguläre Streueignisse zu sehen.

Eine Möglichkeit, eine obere Schranke für den Instantonwirkungsquerschnitt zu bestimmen besteht darin, den Wert von t zu bestimmen, oberhalb dessen gemäß der Erwartung mehr als die Hälfte der Ereignisse Instantonereignisse wären. Da es nicht mehr Instantonereignisse geben kann, als Ereignisse beobachtet wer-

den, bekommt man eine obere Schranke für die Zahl von Instantonereignissen, wenn man annimmt, dass alle beobachteten Ereignisse in diesem Bereich Instantonereignisse sind. Diese Methode liefert einen Wert von $\sigma_{\text{inst}} < 26 \text{ pb}$ bei einer theoretischen Erwartung von 8.9 pb . Die Methode muss also noch mindestens um einen Faktor drei verbessert werden, damit ein Instantonsignal mit der theoretisch vorhergesagten Stärke aus dem Untergrund gefiltert werden kann.