

Abbildung 16: *Das große Straw Tube Tracker (STT) Modul kurz vor dem Einbau.*

ZEUS-Experiment

Beteiligte Institute: 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. 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, Korea Univ. und Nat. 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: B. Foster, Univ. of Bristol

Der Berichtszeitraum stand diesmal ganz im Zeichen des Umbaus von HERA zur Luminositäts-erhöhung. Luminositätsbetrieb mit Datennahme der Experimente fand deshalb nicht statt. Um die zu erwartende hohe Luminosität bei HERA optimal zu nutzen, wurde der ZEUS Detektor sorgfältig überholt, und es wurden ein Silizium-Mikro-Vertex-Detektor (MVD), ein Straw Tube Tracker (STT) (Abb. 16) und ein neues Luminositäts-Monitoringsystem installiert. Darüber hinaus fanden umfangreiche Reparaturen am Kalorimeter, dem Hadron-Elektron Separator, dem Backing Kalorimeter und den Myonkammern statt. Der eigentliche Detektorumbau endete im Juli mit dem Beginn der Wiederinbetriebnahme des HERA-Speicherrings.

Die verbleibende Zeit wurde zum Testen der neuen Detektorkomponenten und ihrer Integration in das bestehende Datennahmesystem von ZEUS benutzt. Das zentrale Datennahmesystem, das Triggersystem und die Rekonstruktions- und Analysekapazitäten wurden ebenfalls der zu erwartenden höheren Datenmenge angepasst.

Die ZEUS Kollaboration hat in diesem Jahr 12 Veröffentlichungen verfasst. Einige der Physikresultate werden vorgestellt.

Neue Detektorkomponenten

Mikro-Vertex-Detektor

Im vorangegangenen Berichtsjahr war in der JADE-Halle ein Testgebiet vorbereitet worden, in dem der Mikro-Vertex-Detektor (MVD) in seiner endgültigen Form aufgebaut und ausgetestet wurde.

Im März wurde der komplett mit Strahlrohr montierte MVD kontinuierlich für drei Wochen im 24-Stunden-Betrieb ausgetestet, um so weit wie möglich alle System-Aspekte der Hard- und Software zu untersuchen. Zusätzlich wurden, getriggert mit einem stark segmentierten Szintillator-Teleskop, Daten mit Höhenstrahlung genommen. Die Analyse der Daten zeigte, dass 210 von 212 Modulen voll funktionsfähig waren. Das Signal/Rauschverhältnis von ungefähr 14:1 entsprach den Erwartungen. Die anschließende Spur-Rekonstruktion ergab bei Annahme der nominalen Position der Detektor-Module einen ersten Wert für die Ortsauflösung von etwa $70\ \mu\text{m}$. Werden die gemessenen, systematischen Versetzungen bei der Montage mit berücksichtigt, so ist nach einer Feinjustierung mit hochenergetischen Spuren eine Punktauflösung von

besser als 20 μm zu erwarten. Am 30. März wurde der MVD erfolgreich in ZEUS eingebaut, im April wurde die Infrastruktur für die Elektronik und Kühlung in Betrieb genommen und im Mai und Juni erfolgte die endgültige Verkabelung. Test-Messungen und ein kurzer Cosmic-Run vor dem Anfahren von HERA zeigten, dass sich der MVD in ZEUS genauso verhielt wie im Systemtest. Rund um das Strahlrohr in der Vorwärts- und Rückwärtsrichtung wurden 1 cm^2 große Si-Dioden als Strahlungsmonitore installiert. Der Strahlungsmonitor misst sowohl die momentane als auch die integrierte deponierte Dosis und liefert im Falle von anhaltend hoher Dosisleistung ein Signal zum Auslösen des Lepton-Dumps. Schon mit einer vorläufigen Auslese-Elektronik war der Monitor ein unverzichtbares Werkzeug beim Steuern des Strahles durch die Wechselwirkungszone, um zu hohe Strahlenbelastungen beim Einfahren der Speicherringe zu vermeiden. Zusätzlich zu diesen Dioden werden Radfets und TLDs als Strahlungsmonitore benutzt.

Im August kam es zu einem unkontrollierten Protonenstrahl-Verlust, der einen allgemeinen, permanenten Anstieg des Leckstromes in den Si-Sensoren des MVD und in den Si-Strahlungsmonitoren zur Folge hatte, wie es von Schädigungen durch hadronische Strahlung zu erwarten ist. Anfang Dezember kam es zu einer weiteren, allerdings sehr lokalen Schädigung, die wahrscheinlich auf Synchrotronstrahlung zurückzuführen ist. Bis zum Jahresende wurden, abhängig von der Position der Strahlungsmonitore, bis zu 150 Gray gemessen, eine Dosis, die für den kurzen Zeitraum und die niedrigen Strahlströme viel zu hoch ist und nur für die Zeit des Einfahrens der Maschine toleriert werden kann.

Straw Tube Tracker

Der ZEUS Straw Tube Tracker (STT) wurde gebaut, um die Spurrekonstruktion geladener Teilchen in Vorwärtsrichtung (Protonrichtung) deutlich zu verbessern. Der Detektor wurde Anfang 2001 fertig gestellt und im April an Stelle des Übergangsstrahlungsdetektors in ZEUS eingebaut.

Ein Strohhalm (Straw Tube) besteht aus einem Rohr aus dünner Kaptonfolie (120 μm Wandstärke und 7.47 mm Durchmesser) mit einem Draht in der Mitte, an den

Hochspannung angelegt wird. Dieses Detektorkonzept wurde von MEPHI in Moskau für den LHC entwickelt und zeichnet sich durch gute Ortsauflösung und geringe Hit-Multiplizität pro Strohhalm selbst bei hohem Untergrund aus.

Der Detektor besteht aus zwei Modulen mit je 24 Sektoren in zwei unterschiedlichen Größen. Jeder Sektor besteht aus 194 bzw. 266 Straw Tubes von 20 bis 102 cm Länge, die in drei Lagen angeordnet sind. Der gesamte STT besteht aus etwa 11 000 Straw Tubes.

Der mechanische Zusammenbau der Sektoren fand in Toronto (York Univ.), Freiburg (Univ. Freiburg) und Hamburg (DESY, Univ. Bonn, Univ. Hamburg, MEPHI) statt. Die Lieferung der Elektronik, die in Argonne, Siegen und Tel Aviv gebaut wurde, war etwas verzögert. Dank großer Anstrengungen der Mitarbeiter aus Bonn, Freiburg, MEPHI, York und Andrews konnte dennoch alles rechtzeitig vor dem geplanten Einbautermin im April montiert und getestet werden. Das große STT-Modul mit eingebauter Frontend-Elektronik ist in Abbildung 16 zu sehen.

Die Online-Software für den STT wurde 2001 weitgehend fertig gestellt. Hauptziele der Softwareentwicklung für Simulation und Rekonstruktion von Spuren im STT waren die Reduktion der Rechenzeit und die Integration in die ZEUS-Umgebung. Bei beiden Projekten wurden große Fortschritte gemacht.

Im Jahr 2001 wurden auch weitere Teststrahlungsmessungen mit einem baugleichen Sektor durchgeführt, um Effizienz und Auflösung des Detektors genauer zu untersuchen. Dabei wurde das Silizium-Teleskop der Mikrovertex-Gruppe verwendet, um zu bestimmen, wo eine Spur durch den Sektor verlief. Mit der ZEUS-Elektronik und einer 90:10 Ar/CO₂ Gasmischung wird eine Effizienz pro Draht zwischen 92% und 98% und eine Auflösung zwischen 300 μm und 350 μm erwartet, je nachdem, wie die Frontend-Elektronik-Schwelle gesetzt wird. Der später zu benutzende Schwellenwert hängt von den Untergrundbedingungen ab.

Die ersten Daten in ZEUS wurden mit dem STT Ende 2001 aufgenommen, allerdings erforderte der sehr hohe Untergrund von HERA noch die Benutzung hoher Schwellen mit der Folge einer verminderten Effizienz. Die Daten werden zur Zeit ausgewertet und zeigen, dass der Detektor die an ihn gestellten Erwartungen erfüllt.

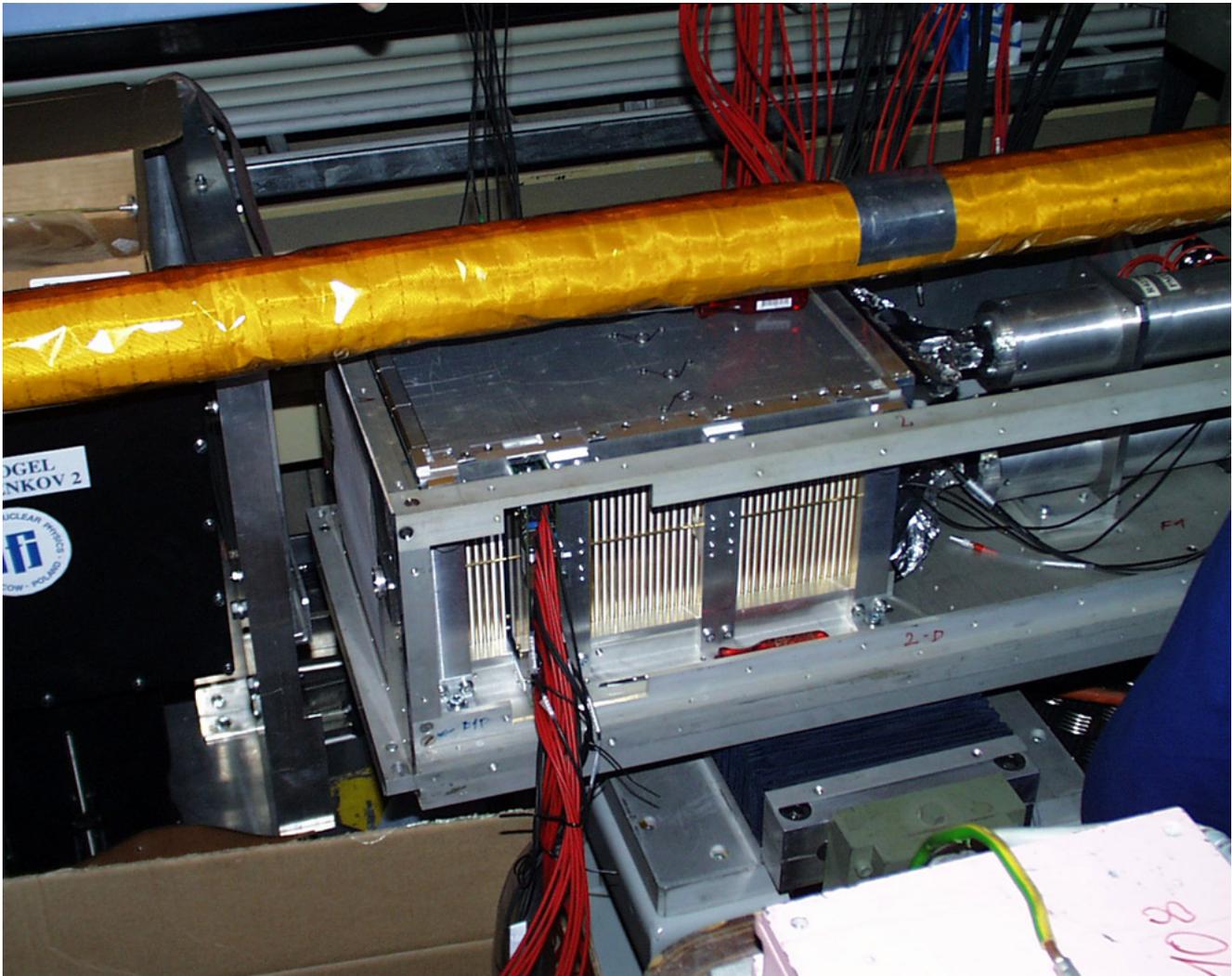


Abbildung 17: Szintillator-Blei Photodetektor des Luminositätsmonitors.

Luminositätsmonitor

Der Neubau des ZEUS Luminositätsmonitor-Systems wurde in diesem Jahr erfolgreich abgeschlossen. Es handelt sich dabei um drei Detektorkomponenten, einen Photodetektor (Abb. 17) und ein Elektron-Positron Paarspektrometer, die zum Nachweis von Photonen aus dem Bethe-Heitler Prozess $e p \rightarrow e p \gamma$ dienen, und einen so genannten „6m Tagger“ zum Nachweis gestreuter Elektronen. Der Photodetektor und das Spektrometer befinden sich im HERA-Tunnel, etwa 105 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt.

Der Neubau des Photodetektors war erforderlich, da sich nach der Luminositätssteigerung von HERA sowohl die Rate von Bremsstrahlungs-Photonen als auch der Synchrotronstrahlungs-Untergrund beträchtlich erhöhen, und der bisherige Photodetektor innerhalb kurzer Zeit durch Strahlenschäden beschädigt worden wäre. Das bisherige Photon-Kalorimeter wurde daher durch ein neues Kalorimeter (Szintillator-Blei Sandwich) mit strahlenfestem Szintillator ersetzt. Zur Reduzierung des Synchrotronstrahlungs-Untergrunds befindet sich unmittelbar vor dem Kalorimeter ein so genannter aktiver Filter aus Kohlenstoff mit vier Strahlungslängen Dicke. Der Filter ist in zwei Teile unterteilt,

hinter denen sich jeweils ein Cherenkov-Detektor befindet. Die niederenergetischen Photonen der Synchrotronstrahlung werden in den Cherenkov-Detektoren nicht nachgewiesen. Der Energieverlust von Bethe-Heitler Photonen im Filter wird dagegen gemessen und zur Korrektur der Energiemessung verwendet.

Zur Verbesserung der Luminositätsmessung wird mit einem Elektron-Positron Paarspektrometer eine weitere, unabhängige Messmethode verwendet. Als Konversionstarget der Bethe-Heitler Photonen wird das Photon-Austrittsfenster in 92 m Abstand vom Wechselwirkungspunkt verwendet. Die erzeugten Elektron-Positron-Paare werden durch einen Dipolmagneten abgelenkt und mit zwei kleinen Kalorimetern, die unmittelbar vor dem Photon-Kalorimeter angeordnet sind, gemessen. Als Detektoren wurden die beiden Module des bisherigen Strahlrohr-Kalorimeters mit geringen Modifikationen wiederverwendet. Der Vorteil dieser Messmethode besteht in einer geringeren Anzahl von Photonen im Spektrometerdetektor aufgrund der geringen Konversionswahrscheinlichkeit. Dadurch gibt es keine Probleme durch Mehrfachphotonen, Synchrotronstrahlungs-Untergrund und Strahlungsschäden.

Zur Bestimmung der Akzeptanz und der Eichung des Photon-Kalorimeters und des Spektrometers wird ein kleines elektromagnetisches Kalorimeter verwendet, der so genannte „6m-Tagger“ (6 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt), mit dem, in Koinzidenz mit dem Photon, das gestreute Elektron gemessen werden kann.

Alle Detektorkomponenten wurden vor dem Einbau detailliert mit einem DESY-Teststrahl mit Elektronen mit Strahlenergien von 1 bis 6 GeV untersucht. Die Inbetriebnahme der Detektoren nach dem Einbau in den HERA-Tunnel ist inzwischen abgeschlossen. Erste Messungen der Luminosität wurden im Oktober mit dem Photodetektor und dem Paarspektrometer durchgeführt.

Datenverarbeitung

ZEUS-Online Computing

Während der Umbau-Pause wurden wesentliche Bestandteile der zentralen Datenerfassungssysteme

grundlegend modernisiert, um in Hinblick auf Datendurchsatz und Wartbarkeit den Anforderungen nach der Luminositätserhöhung gerecht zu werden. Dabei wurde speziell angefertigte Hardware, die seit Inbetriebnahme des Experiments unverändert betrieben wurde, durch ein leistungsfähiges System aus Standard-PCs und Standard-Netzwerk-Technologien ersetzt. Dieser nun sehr modulare Aufbau hat gezeigt, dass er problemlos die zu erwartenden Datenströme handhaben kann, so dass davon ausgegangen werden kann, dass das dreistufige ZEUS-Datenfiltersystem auch bei der zu erwartenden Luminosität in der Lage sein wird, alle interessanten Ereignisse mit geringer Totzeit für die spätere Analyse auszuwählen und zu archivieren.

ZEUS Offline-Computing

Im Bereich Offline-Computing war das Berichtsjahr durch die grundlegende Umstellung der Infrastruktur auf die Anforderungen der HERA-II-Ära geprägt. Die inzwischen vier Jahre alte Rekonstruktionsfarm wurde vollständig durch ein neues System mit 50 modernen Prozessoren (Linux/Intel) ersetzt, welches die siebenfache Rechenleistung bietet. Mit dieser neuen Farm wurden im Zuge des Reprozessierens bestehender Datenbestände bereits Durchsätze von mehr als 3 Millionen Ereignissen pro Tag erreicht. Auch die zentrale Analyseplattform ZARAH wurde durch eine moderne Farm mit 40 Prozessoren erweitert, welche die alten SGI Challenge-Maschinen ablöst und den Nutzern ein erheblich leistungsfähigeres System zur Analyse der zukünftigen HERA-Daten bereitstellt (Abb. 18).

Zur Speicherung schnell verfügbarer Daten wurde neben dem Ausbau des Hauptfileservers auch erstmals eine zweite Linie aus PC-basierenden Fileservern mit schnellen RAID-Controllern mit zunächst 3 TB Kapazität im praktischen Betrieb erprobt. Nach etlichen notwendigen Anpassungen zeigten diese Systeme ausgezeichnete Leistungen in der Anwendung als Cache für Magnetbanddateien. Darüber hinaus wurde mit der „Scalable Staging Facility“ (SSF) ein Softwaresystem entwickelt, das den transparenten Zugriff auf Magnetbanddateien auf besonders robuste und skalierbare Weise implementiert und den Parallelbetrieb mehrerer Staging-Server erlaubt. Die Speicherung von Ereignis-Metadaten erfolgt unter Verwendung der



Abbildung 18: ZEUS-Farmen für Rekonstruktion und Analyse.

objekt-orientierten Datenbank „Objectivity“, welche inzwischen in der Version 6 auch auf Linux-Systemen intensiv eingesetzt wird.

Physikalische Ergebnisse

Eine Auswahl von im Berichtszeitraum veröffentlichten Ergebnissen wird im Folgenden vorgestellt.

Messung der Strukturfunktion F_2^{em} in tiefunelastischer Streuung

Die Quantenchromodynamik (QCD) ist die Theorie der starken Wechselwirkung, einer der vier fundamentalen Wechselwirkungen der Natur. Sie beschreibt die Wechselwirkungen von Quarks und Gluonen, aus denen das Proton besteht. Die Veränderung der Impulsverteilung der Partonen im Proton als Funktion von Q^2 , dem Quadrat des Viererimpulsübertrages auf das gestreute Quark, lässt sich mit Mitteln der Störungstheorie innerhalb der Quantenchromodynamik vorhersagen. Bei HERA kann mit der Strukturfunktion F_2 die Impulsverteilung der Partonen mit Ereignissen der Photon-Quark-Streuung direkt gemessen werden. Diese Messung ist eine der wichtigsten bei HERA, da sie zum einen zur Kenntnis der Struktur des Protons bei den höchsten zugänglichen Energien führt, und zum anderen erlaubt, die Vorhersagen der Quantenchromodynamik in

einem großen kinematischen Bereich zu testen. Es wurden differentielle Wirkungsquerschnitte für Reaktionen des neutralen Stromes als Funktion des Impulsanteiles x des getretenen Partons im Proton und als Funktion von Q^2 , der Virtualität des ausgetauschten Eichbosons, gemessen. Aus den gemessenen Wirkungsquerschnitten wurden alle Anteile vom Z^0 -Austausch herausgerechnet und die Strukturfunktion F_2^{em} bestimmt, die die Partonverteilung im Proton für den Fall des reinen Photon-Austausches beschreibt.

Die vorgelegte Messung beruht auf einem Datensatz, der um einen Faktor 12 größer ist als die Datenmenge einer früheren Analyse aus dem Jahre 1996. Die größere Datenmenge hat detaillierte Studien zum Verständnis des Detektors ermöglicht, so dass fast im gesamten kinematischen Bereich eine Genauigkeit von 2% erreicht werden konnte.

Abbildung 19 zeigt F_2^{em} als Funktion von Q^2 bei verschiedenen Werten von x . Bei kleinen x -Werten steigt die Strukturfunktion steil an und zeigt eine deutliche Q^2 -Abhängigkeit, die auf eine zunehmende Zahl von Gluonen im Proton deutet. Die eingezeichnete Kurve ist eine von der ZEUS-Kollaboration durchgeführte globale Anpassung der Daten gemäß der störungstheoretischen QCD-Entwicklung nach dem DGLAP-Schema, in die neben den ZEUS-Daten auch Daten von einigen Experimenten bei niedrigerer Energie eingehen. Die gute Übereinstimmung der Anpassung mit den Datenpunkten zeigt, dass im gesamten Anwendungsbereich der Methode der Störungstheorie, der sich über vier Größenordnungen in x und über mehr als vier Größenordnungen in Q^2 erstreckt, die Protonstruktur von der Quantenchromodynamik beschrieben wird.

Ereignisse mit prompten Photonen

Im Rahmen von Strukturuntersuchungen des Protons ist eine wichtige Frage, welchen mittleren Transversalimpuls die Quarks im Proton haben. Bis vor Kurzem ging man davon aus, dass dieser Transversalimpuls einige hundert MeV beträgt und unabhängig von der Energie des Protons ist. Aus $p\bar{p}$ Experimenten bei Fermilab ergibt sich, dass in hochenergetischen Streuprozessen der mittlere Transversalimpuls durch Gluonenabstrahlung im Anfangszustand der Reaktion innerhalb des Protons ansteigt.

ZEUS

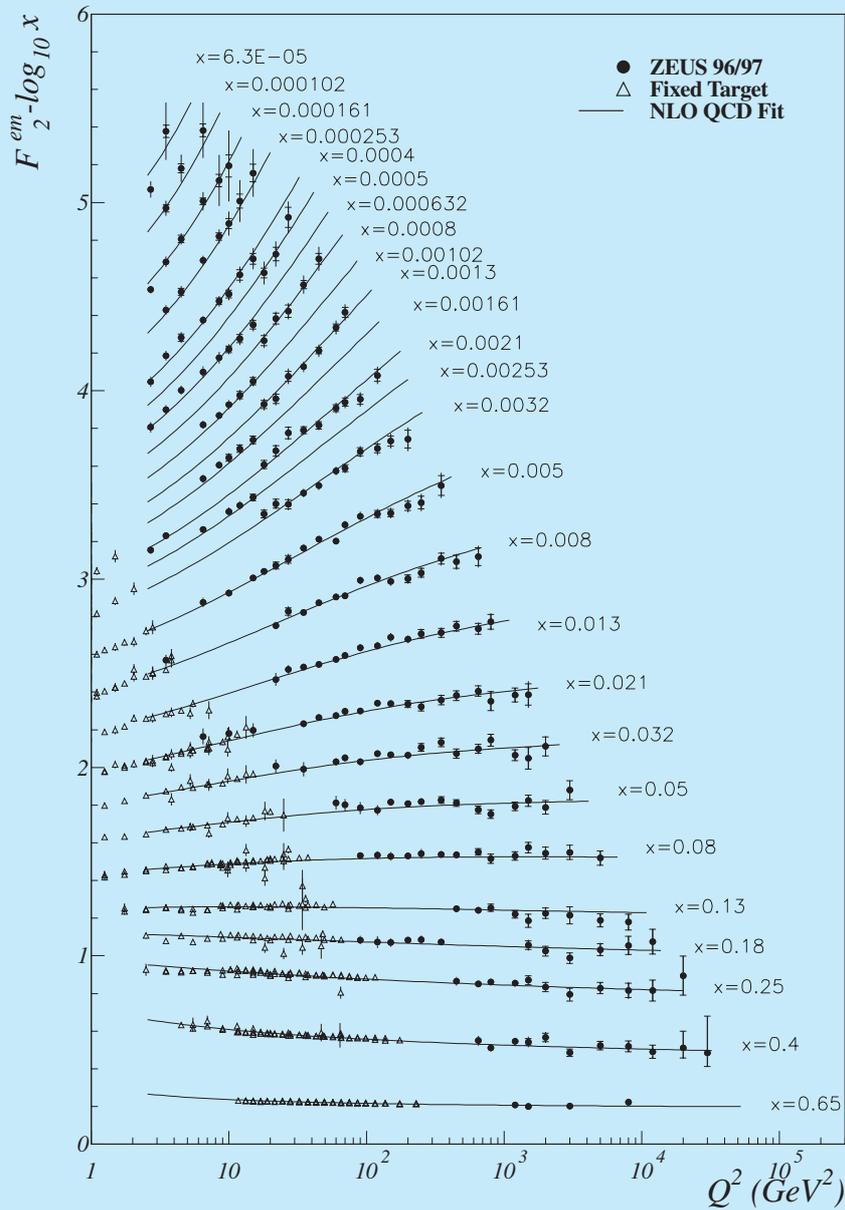


Abbildung 19: Ergebnisse für F_2^{em} von ZEUS (Punkte) als Funktion von Q^2 für feste Werte der Bjorken- x -Variablen. Gezeigt sind auch Ergebnisse der Experimente NMC, BCDMS und E665 (Dreiecke) sowie die ZEUS NLO QCD-Anpassung als Kurve. Der starke Anstieg der Strukturfunktion mit kleiner werdenden x -Werten weist auf eine zunehmende Zahl von Gluonen im Proton hin. Die QCD-Anpassung kann die Daten im gesamten Anwendungsbereich der Störungstheorie, der sich über vier Größenordnungen in x und Q^2 erstreckt, beschreiben.

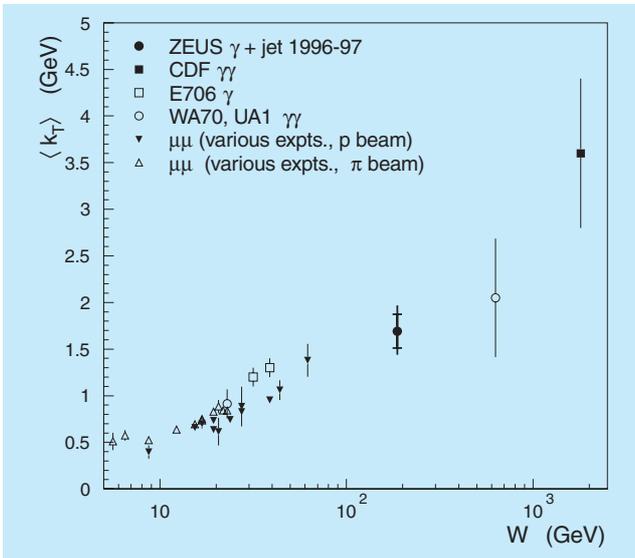


Abbildung 20: Messungen des mittleren Transversalimpulses $\langle k_T \rangle$ der Partonen im Proton als Funktion der Schwerpunktsenergie der Reaktion aus verschiedenen Experimenten. Die Energieabhängigkeit weist auf Gluon-Abstrahlung im Anfangszustand hin.

Zur Untersuchung dieser Frage bei HERA wurden Photoproduktions-Ereignisse der QCD-Compton-Streuung analysiert. Hierbei streut ein reelles Photon an einem Quark des Protons und schlägt es heraus. Das Quark hadronisiert, und im Endzustand werden das Photon und die Hadronen nachgewiesen. Diese Photonen, die aus dem harten Streuprozess stammen und nicht weiter mit den entstehenden Hadronen wechselwirken, nennt man prompte Photonen. Verglichen werden die Daten mit Vorhersagen von Simulationen, die auf störungstheoretischen Rechnungen beruhen. Die Vorhersagen hängen von dem störungstheoretisch nicht berechenbaren mittleren Transversalimpuls der Partonen im Proton k_T^{intr} ab. Durch Anpassung dieses Parameters ergibt sich für die ZEUS-Daten

$$\langle k_T^{\text{intr}} \rangle = 1.69 \pm 0.18_{-0.20}^{+0.18} \text{ GeV.}$$

Dieser Wert liegt deutlich über den bisherigen Annahmen. Abbildung 20 zeigt eine Zusammenstellung von Messungen von verschiedenen Experimenten. Dargestellt sind die gefundenen Werte für $\langle k_T^{\text{intr}} \rangle$ als Funktion der Schwerpunktsenergie der Reaktion. Der Wert

von ZEUS stimmt mit den anderen Daten und einem systematischen Anstieg von $\langle k_T^{\text{intr}} \rangle$ mit der Schwerpunktsenergie überein. Dies bedeutet, dass Anfangs- und Endzustand der Reaktion nicht unabhängig voneinander sind, und dass das Proton von dem harten Prozess „weiß“ und Gluonen abstrahlt. Dieses Ergebnis ist von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Gluonverteilung im Proton, da nur bei seiner Berücksichtigung die Messungen der Gluonverteilungen im Proton bei verschiedenen Energien übereinstimmen.

QCD Untersuchungen mit 2-Jet Ereignissen

Untersuchungen der durch die Quantenchromodynamik beschriebenen starken Wechselwirkung gehören bei HERA zu den wichtigsten Analysen. Anders als die drei übrigen fundamentalen Wechselwirkungen nimmt die Stärke der starken Wechselwirkung, die durch die Kopplungskonstante α_s beschrieben wird, mit zunehmendem Abstand zu und erreicht einen Wert von etwa 1 im Bereich von etwa 1 fm. Dies führt zu dem, dass Quarks nie einzeln nachgewiesen werden können, sondern bei größer werdendem Abstand neue Quarks erzeugt werden, die Hadronen bilden. Zum anderen wird die Wechselwirkung bei sehr kleinen Abständen sehr schwach, so dass sich Quarks und Gluonen bei sehr kleinen Abständen, wie zum Beispiel innerhalb von Hadronen, fast frei bewegen können.

Eine viel diskutierte Frage ist, bei welcher Energie die starke Wechselwirkung so schwach wird, dass ihre Stärke mit der der anderen Wechselwirkungen vergleichbar wird. Da diese Energie weit über der von Beschleunigern liegt, ist man auf Extrapolationen angewiesen. Dazu ist eine möglichst präzise Kenntnis der Kopplungsstärke der starken Wechselwirkung und ihrer Energieabhängigkeit notwendig. Diese wird von der Quantenchromodynamik vorhergesagt, und ihre Messung ist daher ein kritischer Test der Quantenchromodynamik.

In der tiefunelastischen Streuung gibt es Prozesse (QCD-Compton-Streuung und Boson-Gluon-Fusion), bei denen durch Gluon-Emission zusätzlich zum Protonrest zwei Jets produziert werden. Diese „2+1“ Ereignisse eignen sich besonders gut, um störungstheore-

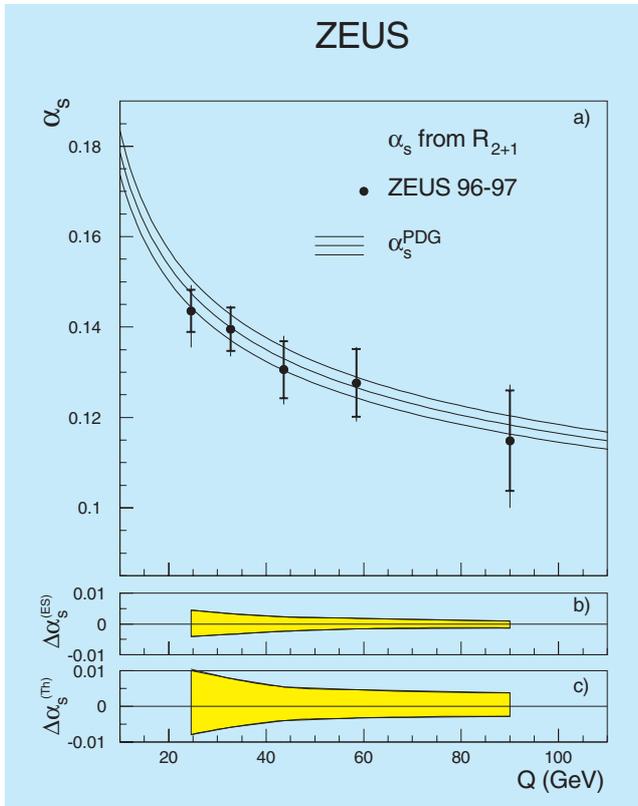


Abbildung 21: Die starke Kopplungskonstante $\alpha_s(Q)$ aus einer QCD-Anpassung der relativen 2-Jet Raten aus Ereignissen der tiefunelastischen Streuung zusammen mit der QCD-Vorhersage ihrer Energieabhängigkeit (a). Die unteren Diagramme zeigen die Unsicherheiten durch die Energiemessung der Jets (b) und die Unsicherheiten der theoretischen Vorhersage (c).

tische QCD-Rechnungen zu testen, da ihre Häufigkeit direkt von der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung α_s abhängt. Durch eine QCD-Anpassung der relativen Häufigkeit von „2+1“ Ereignissen als Funktion von Q^2 wurde $\alpha_s(Q)$ bestimmt. Abbildung 21 zeigt die Q -Abhängigkeit von α_s zusammen mit den QCD-Vorhersagen. Die vorhergesagte Q -Abhängigkeit ist in den ZEUS-Daten klar zu erkennen, und die gemessenen Werte stimmen innerhalb der Fehler mit den Vorhersagen überein. Für $Q = M_Z$ ergibt sich

$$\alpha_s(M_Z) = 0.1166 \pm 0.0019(\text{stat.})_{-0.0033}^{+0.0024}(\text{exp.})_{-0.0044}^{+0.0057}(\text{theor.}) .$$

Genau wie in der tiefunelastischen 2-Jet Produktion lassen sich auch in der Photoproduktion von 2 Jets störungstheoretische QCD-Vorhersagen testen. In der Photoproduktion werden fast reelle Photonen mit sehr kleinen Viererimpuls-Überträgen ausgetauscht. Diese Photonen können auf zwei verschiedene Weisen mit einem Proton wechselwirken. Ein Photon kann entweder direkt an ein Quark aus dem Proton ankoppeln oder es kann in einen hadronischen Zustand aus Quarks und Gluonen fluktuieren, von dem ein Parton mit dem Proton wechselwirkt. Man spricht im ersten Fall von Prozessen mit direkten Photonen, die mit ihrer gesamten Energie an der Wechselwirkung teilnehmen. Im zweiten Fall spricht man von aufgelösten Photonen, die eine hadronische Struktur haben und bei denen nur ein Teil ihrer Energie an der Wechselwirkung teilnimmt. Es wurden 2-Jet Endzustände in Photoproduktions-Ereignissen analysiert und mit QCD-Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO) verglichen. Die Erzeugungsraten von Ereignissen mit hohen invarianten Massen der Jets werden von NLO QCD-Rechnungen gut vorhergesagt. Der harte Streuprozess kann störungstheoretisch gut beschrieben werden. Diese Rechnungen sind unempfindlich gegen die Wahl der Partonverteilungen im Photon.

Die Untersuchung von Ereignissen mit aufgelösten Photonen zeigt, dass derzeit keine NLO QCD-Rechnung die Daten vollständig beschreiben kann. Die Messungen enthalten aber Informationen über die Partonstruktur des Photons, die zur Verbesserung der Vorhersagen benutzt werden können. Darüber hinaus wurde im invarianten Massenspektrum der Jets nach Z^0 -Bosonen gesucht. Nach Abzug des Untergrundes blieben bei der Masse des Z^0 -Bosons keine Ereignisse übrig. Daraus ergibt sich die erste experimentell bestimmte obere Grenze für Z^0 -Produktion bei HERA:

$$\sigma_{e+p \rightarrow e+Z^0X} < 5.9 \text{ pb} .$$

Messung des totalen Photoproduktions-Wirkungsquerschnitts

Die Vorhersage des totalen Wirkungsquerschnittes ist im Rahmen der Quantenchromodynamik nicht möglich, da viele niederenergetische Endzustände berück-

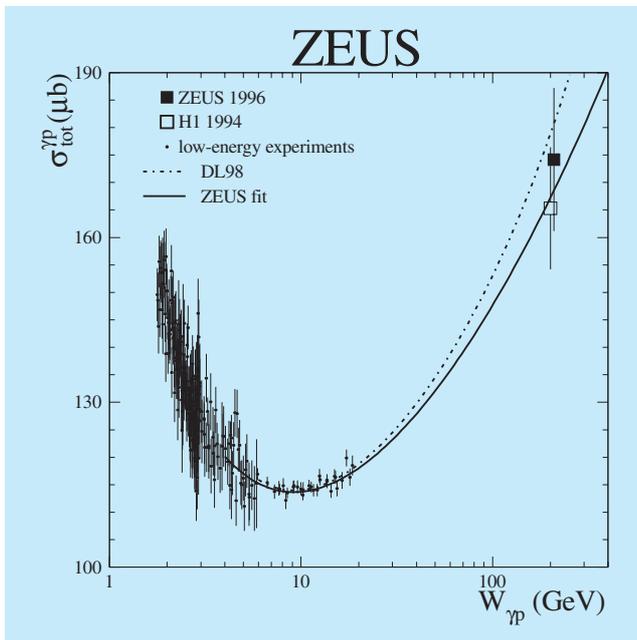


Abbildung 22: Der totale Photon-Proton Wirkungsquerschnitt als Funktion der Photon-Proton Schwerpunktsenergie zusammen mit der Messung von H1 und Daten bei niedrigerer Energie sowie Anpassungen, die auf Vorhersagen der Regge-Theorie beruhen. Bis zu den höchsten Energien können diese Anpassungen die Daten beschreiben. Dies ist ein starker Hinweis auf eine universelle Energieabhängigkeit aller hadronischen Wirkungsquerschnitte.

sichtigt werden müssen, für die die Störungstheorie nicht anwendbar ist. Regge-Theorie ist dagegen sehr erfolgreich in der Beschreibung der Abhängigkeit aller totalen hadronischen Wirkungsquerschnitte reeller Teilchen von der Schwerpunktsenergie.

Die Positronen im Speicherring HERA sind bei Wechselwirkungen mit Protonen eine Quelle sowohl virtueller als auch reeller Photonen, die sich bei der Wechselwirkung auch wie Hadronen verhalten können. Mit einer Messung des totalen Wirkungsquerschnittes $\sigma_{\text{tot}}^{\gamma p}$ für quasi-reelle Photonen bei HERA kann man das Energieverhalten der totalen Wirkungsquerschnitte bei der höchsten experimentell zugänglichen Schwerpunktsenergie testen. Experimentell ist diese Messung sehr schwierig, da das gestreute Positron 35 m strahlabwärts gemessen werden muss, nachdem es im Strahlrohr durch mehrere Magnete des Beschleuniger

abgelenkt worden ist. Die Genauigkeit der Messung hängt entscheidend von der genauen Vermessung des gestreuten Positrons ab. Dies erfordert eine genaue Kenntnis und Kontrolle der Maschinenparameter während der Messung. Deshalb wurde die Messung in speziellen Runs innerhalb weniger Stunden durchgeführt. Es konnte eine im Vergleich zu dem Ergebnis von 1992 deutlich verbesserte Messung mit geringeren systematischen Unsicherheiten durchgeführt werden. In Abbildung 22 ist der neue Wert des totalen Photoproduktions-Wirkungsquerschnittes $\sigma_{\text{tot}}^{\gamma p}$ bei einer γp -Schwerpunktsenergie von 209 GeV dargestellt, zusammen mit Messungen hadronischer Wirkungsquerschnitte bei niedrigeren Energien und dem Ergebnis des H1-Experiments bei der gleichen Energie. Die eingezeichneten Kurven sind Anpassungen von ZEUS bzw. Donnachie und Landshoff, die auf den Vorhersagen der Regge-Theorie beruhen. Die Anpassungen beschreiben die Energieabhängigkeit der Wirkungsquerschnitte bis zu den höchsten Energien. Die Messung zeigt, dass sich die reellen Photonen wie Hadronen verhalten, und unterstützt die Vorstellung einer universellen Energieabhängigkeit aller hadronischen Wirkungsquerschnitte.

Eigenschaften diffraktiver Ereignisse

Ein Teil der tiefunelastischen Streuprozesse verläuft über Reaktionen, bei denen das virtuelle Photon in einen hadronischen Zustand dissoziiert, ohne dass eine Farbladung mit dem Proton ausgetauscht wird. Das Proton kann unversehrt aus der Reaktion hervorgehen oder in einen hadronischen Zustand mit geringer invarianter Masse dissoziieren. Der Impulsübertrag auf das Proton ist meist sehr gering. Deshalb werden das Proton oder seine Dissoziationsprodukte kaum aus der Strahlrichtung abgelenkt und bleiben im Vakuumrohr, ohne den Detektor zu erreichen. Man nennt diese Reaktionen, in Anlehnung an die Optik, diffraktiv.

Da die Dissoziationsprodukte des Photons vorwiegend in Richtung des einfallenden Elektronenstrahls erzeugt werden, entsteht ein Bereich um den Protonenstrahl herum, in dem keine Teilchen erzeugt werden. Man spricht von einer Rapiditätslücke im Ereignis. Dies führt zu einer typischen Topologie sol-

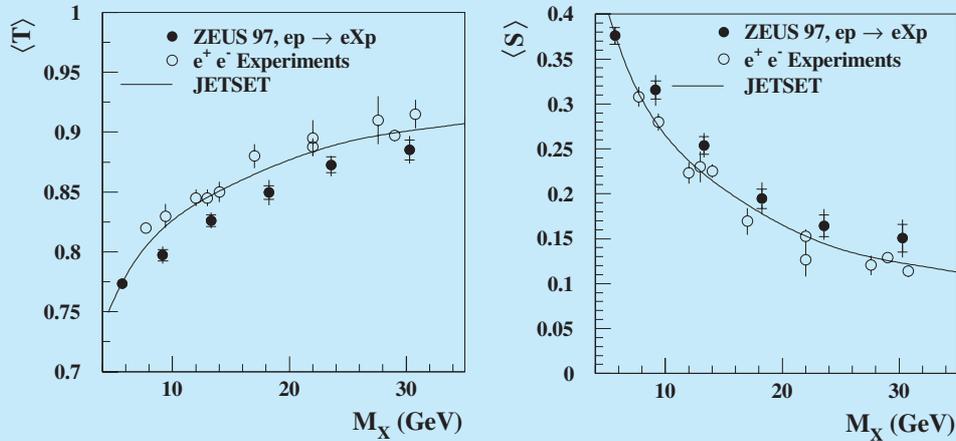


Abbildung 23: Mittlerer Thrust $\langle T \rangle$ und mittlere Spherizität $\langle S \rangle$ als Funktion der Masse des hadronischen Systems M_x für diffraktive Ereignisse der ep -Streuung sowie für e^+e^- -Ereignisse zusammen mit einer Modellvorhersage. Beide Ereignistypen zeigen eine mit zunehmender Masse abnehmende Spherizität und eine zunehmende Kollimierung in Jets. Dies ist ein klares Indiz dafür, dass die Hadronisierung nicht vom Erzeugungsmechanismus der Partonen abhängt.

cher Ereignisse im Detektor, die zur Identifizierung von diffraktiven Ereignissen benutzt wird. Eine zweite Methode, diffraktive Ereignisse auszuwählen, besteht darin, das gestreute, unbeschädigte Proton strahlwärts nach dem Durchlaufen mehrerer Magnete des HERA-Ringes im ZEUS Vorwärts-Protonspektrometer nachzuweisen. Die ZEUS-Kollaboration hat zwei Analysen durchgeführt, um die hadronischen Endzustände aus der Photon-Dissoziation in diffraktiven Prozessen zu studieren. Bei der ersten Analyse wurden die gestreuten Protonen im Vorwärts-Protonspektrometer nachgewiesen. Die Untersuchungen werden im Ruhesystem des im Detektor gemessenen hadronischen Endzustandes mit der invarianten Masse M_x durchgeführt. In diesem System sollten die diffraktiven Ereignisse eine ähnliche Topologie haben wie Ereignisse aus der e^+e^- -Vernichtung bei Schwerpunktsenergien, die gleich der Masse M_x sind.

Die Topologie des Zustands wird charakterisiert durch Messgrößen, die die Spherizität (S) und die Jetartigkeit (Thrust T) der Ereignisse charakterisieren. Für isotrope Endzustände ist $T = 0.5$ und $S = 1.0$, und für kollimierte 2-Jet-Endzustände ist $T = 1.0$ und $S = 0.0$.

Abbildung 23 zeigt die mittleren Thrust- und Spherizitätswerte für diffraktive Ereignisse als Funktion der Masse M_x . Sie sind verglichen mit entsprechenden e^+e^- -Ereignissen und einigen Modellrechnungen. Ergebnisse der H1-Kollaboration sind ebenfalls gezeigt. Man sieht, dass mit steigendem M_x der mittlere Thrust anwächst und die Spherizität abfällt. Die Ereignisse ähneln immer mehr kollimierten 2-Jet-Zuständen. Dieser Trend stimmt mit den e^+e^- -Daten überein und ist damit ein klares Indiz dafür, dass die Hadronisierung der Partonen nicht vom Mechanismus ihrer Erzeugung abhängt.

Aus der Analyse von e^+e^- -Reaktionen ist bekannt, dass bei Schwerpunktsenergien von mehr als 20 GeV neben 2-Jet-Ereignissen auch Ereignisse mit 3 Jets auftreten. Die zweite ZEUS-Analyse von diffraktiven Endzuständen untersucht, ob bei großen invarianten Massen auch 3-Jet-Strukturen auftreten. Es wurden Ereignisse mit einer Rapiditätslücke in Richtung des Protonenstrahls ausgewählt. Im Ruhesystem des hadronischen Endzustands wurde nach Ereignissen mit 3 Jets gesucht. Abbildung 24 zeigt den normierten Energiefluss $1/M_x dE/d\phi^*$ für Ereignisse mit drei ge-

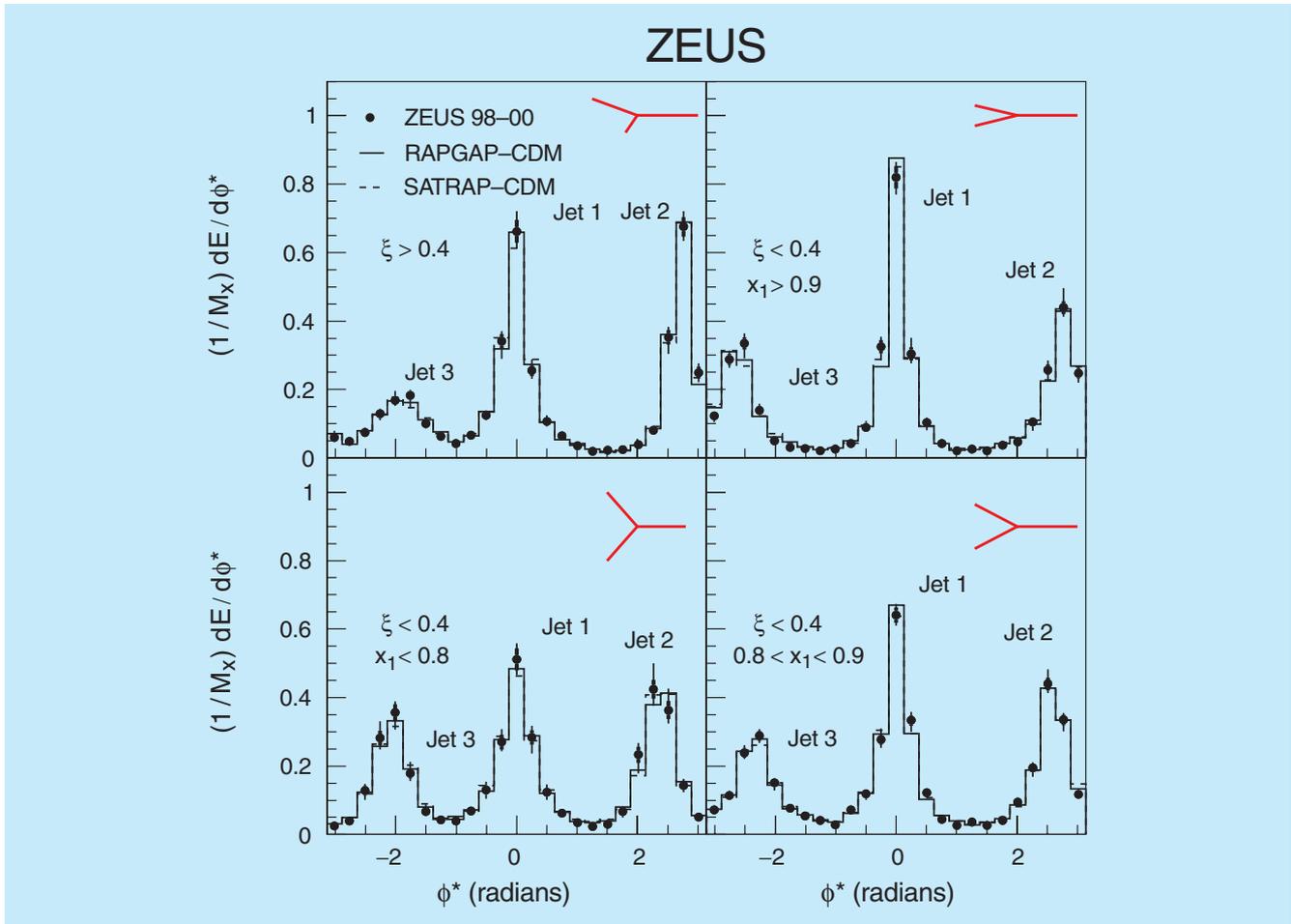


Abbildung 24: Der Energiefluss in diffraktiven 3-Jet Ereignissen in der Ebene der drei Jets als Funktion des Azimutwinkels ϕ^* für verschiedene Topologien (ξ , x_1 -Werte). Die Jet-Konfigurationen sind jeweils in der oberen rechten Bildecke angegeben. Die 3-Jet Struktur ist klar zu erkennen und wird von den Modellen richtig beschrieben.

fundenen Jets, wobei ϕ^* der Azimutwinkel um die Richtung des virtuellen Photons ist. Deutlich sind die Maxima zu erkennen, die den Jets entsprechen. Verschiedene Modellrechnungen können den Energiefluss wiedergeben.

Genauere Untersuchungen der Wirkungsquerschnitte dieser 3-Jet-Ereignisse zeigen aber, dass bisher kein Modell die Daten vollständig beschreiben kann. Insbesondere der absolute Wert des Wirkungsquerschnittes und die Verteilung der Transversalimpulse der am weitesten vorwärts gerichteten Jets werden bei großen Transversalimpulsen unterschätzt.

Suche nach neuen Teilchen und Effekten

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung bei HERA ist die Suche nach neuen Effekten und Teilchen, die nicht vom Standardmodell beschrieben werden. Der HERA-Speicherring bietet hierzu die Möglichkeit bei der höchsten Schwerpunktsenergie in Elektron- bzw. Positron-Proton Kollisionen. Mit den Daten von 1994–1997, die einer integrierten Luminosität von 47.7 pb^{-1} entsprechen, hat die ZEUS-Kollaboration zwei Analysen zur Suche nach exotischen Teilchen durchgeführt. In der ersten Analyse wird nach angeregten ele-

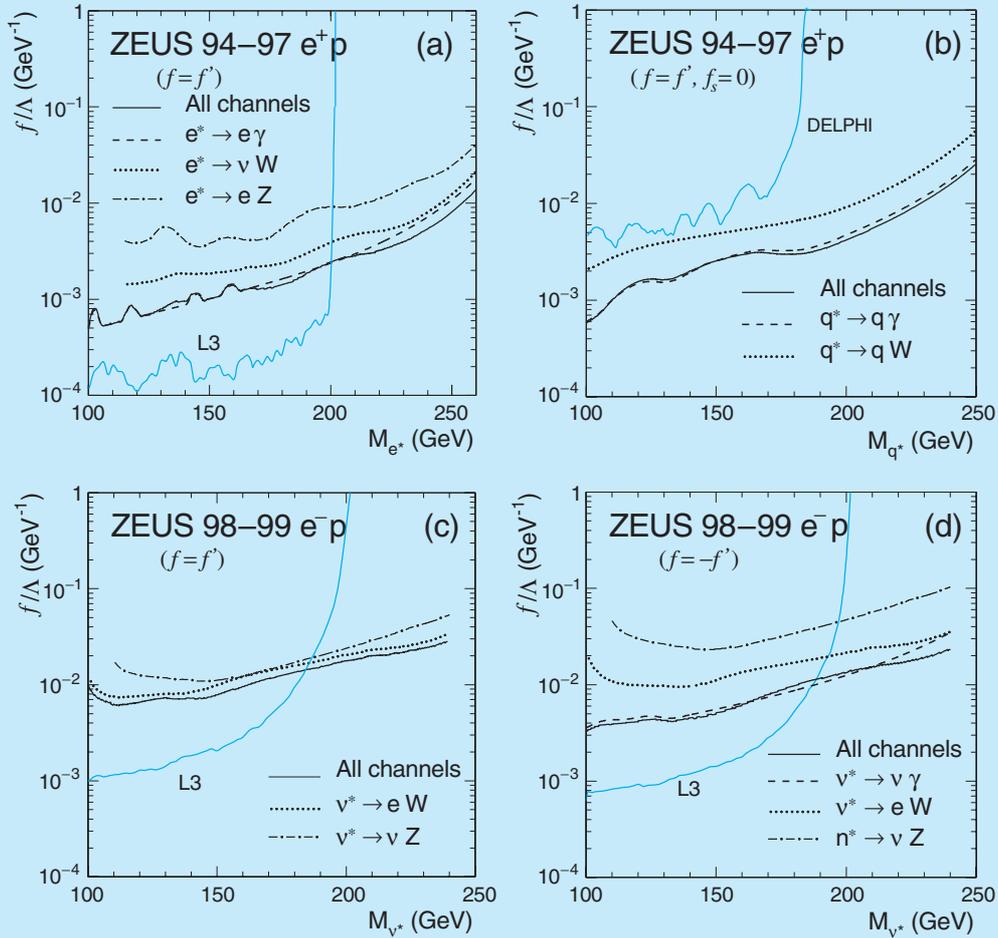


Abbildung 25: Obere Grenzen (95% CL) für die Kopplungen f/Λ von angeregten Fermionen als Funktion ihrer Masse. Zum Vergleich ist die entsprechende Kurve von den LEP-Experimenten L3 und DELPHI mit eingezeichnet.

mentaren Fermionen (e^* , q^* , ν^*) gesucht. Solche Anregungszustände elementarer Fermionen erwartet man, wenn diese Fermionen aus weiteren Bausteinen zusammengesetzt sind. Sie zerfallen in den Grundzustand des Fermions und Photonen, Quarks, W- oder Z-Bosonen und Neutrinos. Gesucht wurde nach den verschiedenen Zerfallsprodukten im Endzustand. Alle Endzustände haben charakteristische Signaturen, wie zum Beispiel bestimmte invariante Massen von Teilchenkombinationen oder große fehlende Transversalimpulse. Mit Simulationen wurden die Akzeptanzen des ZEUS-Detektors für diese Endzustände berechnet und unter gewissen Modellannahmen Vorhersagen für

zu beobachtende Ereigniszahlen gemacht. Es sind keine Signale beobachtet worden. Daraus ergeben sich obere Grenzen für die Produktion angeregter Zustände, die durch Grenzen der jeweiligen Kopplungsstärken f/Λ als Funktion der Masse des angeregten Fermions ausgedrückt werden können. Als Beispiel zeigt Abbildung 25 Grenzen für diese Kopplungsstärken. Durch die hohe Schwerpunktsenergie bei HERA können angeregte Fermionen mit größeren Massen ausgeschlossen werden als bei LEP.

Eine zweite Analyse befasst sich mit der Suche nach Prozessen, in denen das einlaufende Lep-

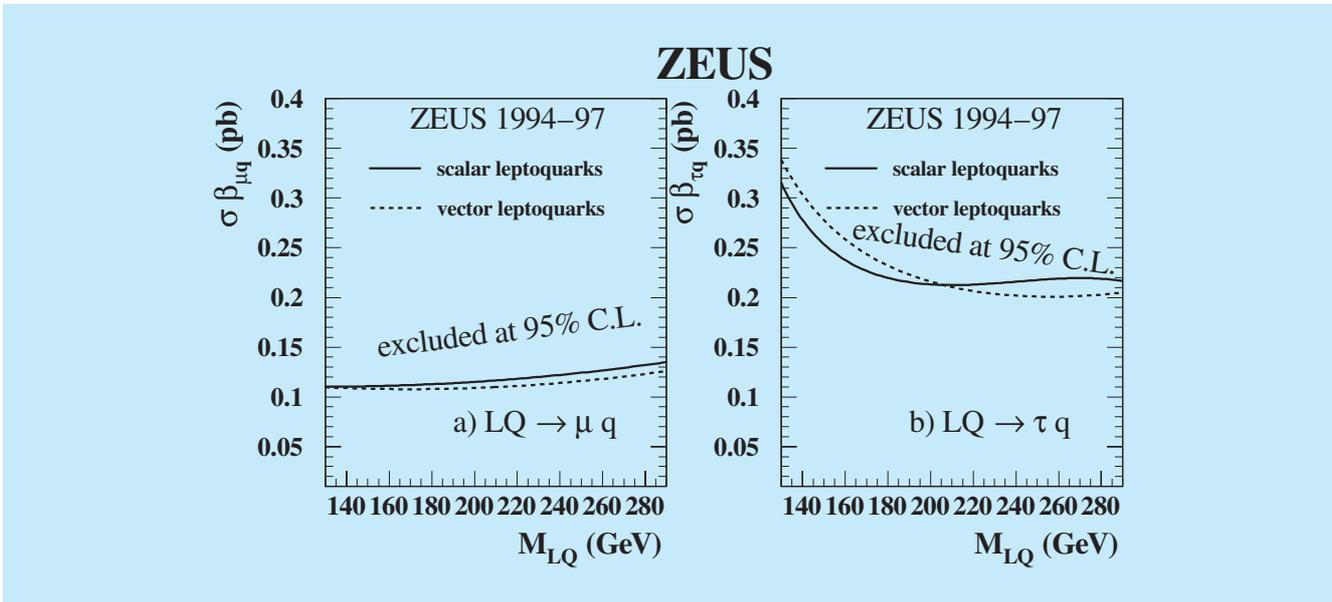


Abbildung 26: Obere Grenzen (95% CL) für die Produktion von Leptoquarks mit anschließenden Zerfällen in Myon-Quark oder Tau-Quark Endzustände. Die Produktionshäufigkeit ist das Produkt aus Erzeugungswirkungsquerschnitt und Verzweigungsverhältnis in den untersuchten Endzustand.

ton (Elektron/Positron) seine Generation im Endzustand ändert, wie $ep \rightarrow \mu X$ oder $ep \rightarrow \tau X$ mit anschließendem Zerfall des τ -Leptons. Modelle mit R-paritätsverletzender Supersymmetrie sowie Theorien mit Leptoquarks sagen derartige Prozesse vorher. Leptoquarks sind Teilchen, die sowohl leptonische wie hadronische Quantenzahlen tragen.

Es wurden keine derartigen Ereignisse gefunden und Grenzen für die Produktionswahrscheinlichkeit von Leptoquarks berechnet. Abbildung 26 zeigt als Beispiel die Grenzen für das Produkt aus Produktionswirkungsquerschnitt für Leptoquarks und dem Verzweigungsverhältnis des Leptoquarks für den anschließenden Zerfall. Einige dieser Grenzen, insbesondere für $e \rightarrow \tau$, sind die derzeit strengsten.