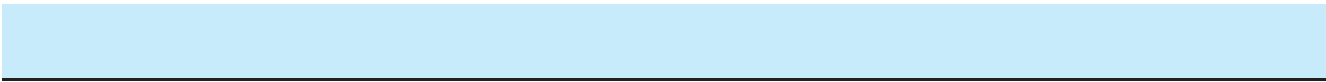


Bereich Forschung Hochenergiephysik

Inhalt

Übersicht	35
H1 Experiment	41
ZEUS Experiment	55
HERMES Experiment	67
HERA-B Experiment	77
Forschung an Lepton Collidern	85
Forschung Linearbeschleuniger	93
Theoretische Physik	101



Übersicht Forschung Hochenergiephysik

Strategie Teilchen- und Astroteilchenphysik

Nach der Entscheidung der Bundesregierung, den von DESY vorgeschlagene Röntgenlaser X-FEL im Rahmen eines europäischen Röntgenlaserlabors in Hamburg zu bauen, aber zum jetzigen Zeitpunkt keinen deutschen Standort für den Linearbeschleuniger TESLA vorzuschlagen, hat das Direktorium im Frühjahr 2003 eine Strategiegruppe „Teilchen- und Astroteilchenphysik“ einberufen. Der zweite Grund für Einberufung einer Strategiegruppe war die Erarbeitung des DESY Forschungsprogramms für die Zeit 2005–2009 in Vorbereitung der Evaluation im Rahmen der programmorientierten Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft.

Mitglieder dieser Strategiegruppe waren, neben Mitgliedern des DESY-Direktoriums, die Vorsitzenden des Wissenschaftlichen Rates und des PRC (Physics Research Committee), Mitarbeiter des DESY sowie Nutzer des DESY von in- und ausländischen Forschergruppen. Die Hauptergebnisse der Strategiegruppe sind:

Für die experimentelle Teilchenphysik ist die höchste Priorität der Betrieb von HERA und der HERA-Experimente bis 2007. Ziel ist es, einer integrierten Luminosität von 1 pb^{-1} mit polarisierten Positronen und Elektronen möglichst nahe zu kommen. Ab 2007 ist die erste Priorität das Experimentierprogramm an einem Linear Collider. Außerdem soll DESY an einem Experiment an einem externen Beschleuniger in der Zeit zwischen HERA und einem Linear Collider teilnehmen.

Für die Astroteilchenphysik ist die höchste Priorität der erfolgreiche Betrieb und die wissenschaftliche Nutzung des Baikal- und des AMANDA-Experiments sowie – in enger Zusammenarbeit mit deutschen Universitätsgruppen – eine zentrale Rolle bei Bau, Betrieb und wissenschaftlicher Nutzung des IceCube-Detektors. Außer-

dem soll in Zeuthen das europäische Analysezentrum für AMANDA/IceCube weiter ausgebaut werden.

Die theoretische Teilchenphysik soll auf dem jetzigen Stand erhalten bleiben, wobei Verschiebungen von Schwerpunkten, wie zum Beispiel Teilchenkosmologie und Stringtheorie geplant sind. Auch in Zukunft sollen Gittereichtheorie und der Betrieb von Spezialrechnern für deutsche Teilchenphysiker ein Schwerpunkt des Programms in Zeuthen bleiben. Allerdings erfordern die Beschaffung und der Betrieb der geforderten 15 Teraflops Rechenleistung zusätzliche Mittel, die eingeworben werden müssen.

Die Mitarbeit experimenteller Teilchenphysiker an F&E für Linearbeschleuniger für den Röntgenlaser und den Linear Collider sowie an der gemeinsamen Entwicklung von Detektoren und Nachweismethoden für Synchrotronstrahlung und Teilchenphysik soll verstärkt werden.

Das von der Strategiegruppe ausgearbeitete Programm wurde in einem vom KET (Komitee für Teilchenphysik) am DESY organisierten Treffen der Gemeinschaft deutscher Teilchenphysiker vorgestellt und ausführlich diskutiert. Außerdem wurde es von einer Untergruppe des Wissenschaftlichen Rates ausgezeichnet begutachtet.

Die Arbeit der Strategiegruppe ist die Grundlage der Programmvorschlüsse 2005–2009, die im Dezember 2003 an die HGF gesandt wurden und auf deren Basis die HGF-Evaluation Anfang 2004 stattfindet.

HERA

Seit dem Wiederanlaufen von HERA nach dem 2000/2001 Umbau war der Betrieb von HERA durch Untergrund in den beiden Collider-Experimenten H1 und ZEUS nur bei reduzierten Strahlströmen möglich.

Die geplante spezifische Luminosität, ein Maß für die Fokussierung der Teilchenstrahlen an den Wechselwirkungspunkten, wurde erreicht und Positronen mit etwa 50% Polarisation konnten allen drei Experimenten H1, ZEUS und HERMES zur Verfügung gestellt werden.

Durch die enge Zusammenarbeit zwischen HERA und den Experimenten, unterstützt durch eine externe Gutachtergruppe, gelang es die Untergrundprobleme weitgehend zu verstehen und Verbesserungsvorschläge auszuarbeiten. Diese wurden in einem Shutdown zwischen März und August 2003 ausgeführt. Gleichzeitig wurde eine Anzahl von Reparaturen an den Experimenten durchgeführt. Nach dem Einlaufen konnte im Oktober wieder mit dem HERA-Luminositätsbetrieb begonnen werden. Die Verbesserungen waren erfolgreich: die Strahlströme können kontinuierlich hochgefahren werden und Extrapolationen zeigen, dass der Untergrund auch bei Nominalströmen kein Problem sein sollte. Wie geplant können die Strahlströme allerdings nur langsam hochgefahren werden, so dass die nominale Luminosität voraussichtlich nicht vor Ende 2004 erreicht wird. Die Effizienz von HERA war durch eine Anzahl von technischen Ausfällen begrenzt, die auch mit dem Alter von HERA zusammenhängen. Die Ursachen wurden analysiert und ein Wartungsprogramm eingeleitet.

Das HERA-B Experiment konnte zwischen Sommer 2002 und März 2003 insgesamt 150 Millionen Ereignisse mit dem Zwei-Leptonen-Trigger aufzeichnen. Mit etwa 300 000 Ereignissen mit einem J/ψ im Endzustand konnte das Experiment die Statistik aus dem Jahre 2000 um einen Faktor 50 vergrößern. Zusätzlich wurde ein großer Datensatz unelastischer Wechselwirkungen aufgezeichnet. Die Qualität der Daten ist ausgezeichnet und es konnten bereits erste physikalische Ergebnisse vorgestellt werden. Im März 2003 hat die HERA-B Kollaboration entschieden keine weiteren Daten zu nehmen und sich ganz auf die Analyse der Daten zu konzentrieren. Untergruppen von HERA-B haben vorgeschlagen mit dem HERA-B Spektrometer weitere Daten zu Teilchen mit Charm (HERA-c) bzw. zur Suche nach exotischen Mesonen (HERA-g) zu nehmen. Nach einer Begutachtung durch das PRC (Physics Research Committee) hat das Direktorium die Experimente abgelehnt. Damit ist die Datennahme mit dem HERA-B Spektrometer abgeschlossen.

Das HERMES-Experiment konnte 2002–2003 erfolgreich Daten mit einem transversal polarisierten Proto-

nentarget aufzeichnen und weltweit erste Ergebnisse zu „Transversity-Strukturfunktionen“ vorstellen. Besonderes Interesse verdienen auch die Messung der tief-virtuellen Compton-Streuung (DVCS) an Kernen, die einen ersten Schritt in Richtung der Bestimmung der Generalisierten Parton-Verteilungen (GPD) darstellt und die Beobachtung einer Resonanz bei einer pK_0 -Masse von 1528 MeV, die als weitere Evidenz für ein Pentaquark, das ein seltsames Quark enthält, angesehen werden kann.

Die Experimente H1 und ZEUS konnten eine Anzahl von Analysen des großen HERA-I Datensatzes abschließen. Erstmals konnten unter ausschließlicher Verwendung von Daten der HERA-Experimente die Partonverteilungen innerhalb des Protons bestimmt werden. Besondere Beachtung verdient auch die empfindliche Suche von Effekten jenseits des Standardmodells (zum Beispiel Kontaktwechselwirkungen bei Skalen bis 1 TeV oder die Erzeugung einzelner top-Quarks), die Struktur des Photons als Funktion seiner Virtualität sowie Untersuchungen zur diffraktiven Streuung (zum Beispiel Messung von DVCS (Deep-Virtual-Compton-Scattering), Erzeugung von Charm in Diffraktion und die Präzisionsmessung der J/ψ -Erzeugung in tief-unelastischer Streuung und Photoproduktion). Trotz weiterer Studien konnte der Ursprung der „HERA-Ereignisse“ Multi-Leptonereignisse und Ereignisse mit Leptonen und fehlendem Transversalimpuls) nicht geklärt werden – dies muss wohl auf den größeren Datensatz, der ab 2004 zu Verfügung stehen wird, warten.

Linear Collider

Im Jahre 2003 ist die internationale Gemeinschaft der Teilchenphysiker übereingekommen, dass ein Elektron-Positron Linearbeschleuniger mit einer Maximalenergie zwischen 0.5 und etwa 1 TeV das nächste Projekt der Teilchenphysik sein soll. Dies wurde in allen drei Weltregionen Amerika, Asien und Europa beschlossen. Dieser bisher einmalige wissenschaftliche Konsens ist inzwischen auch von höchsten politischen Gremien, wie der Runde der Wissenschaftsminister der OECD, anerkannt worden. An dieser Entwicklung haben DESY und seine europäischen Partner, die die Studien zur Physik eines Linear Colliders von Anfang an

international eingebunden und eng mit den anderen Regionen abgestimmt haben, einen maßgeblichen Anteil. 2003 endete wie geplant die ECFA/DESY-Studie mit einem Treffen in Amsterdam. Die Arbeiten werden im Rahmen der „ECFA Linear Collider Study“ fortgesetzt.

Die Physikstudien der Gruppe FLC widmen sich folgenden Themen: Verbindung der LC-Physik zu Fragen der Kosmologie und Astrophysik, Präzisionsanalysen supersymmetrischer Modelle, Einfluss der Beschleuniger- und Detektorparameter auf die Qualität der physikalischen Messungen und Verbesserung der Rekonstruktions- und Analyse-Software. Zusätzlich wurde in einer Arbeitsgruppe mitgearbeitet, die untersucht, wie sich die physikalischen Ergebnisse des LHC am CERN und des LC beeinflussen und ergänzen. Große experimentelle Fortschritte wurden auch bei der Entwicklung einer TPC für einen Linear Collider-Detektor und bei der Hadronenkalorimetrie erzielt. Sowohl die Teststrahlen des DESY als auch ein Testaufbau mit einem 5 Tesla Magnetfeld wurden von mehreren auswärtigen Gruppen benutzt.

Die Gruppe FDET arbeitet an Fragestellungen in Zusammenhang mit supraleitenden Beschleunigern. Zu den herausragenden Ergebnissen zählen die Beiträge zu supraleitenden Resonatoren, die dank des verbesserten Verständnisses der Oberflächeneigenschaften und der Verbesserung der Oberflächenpräparation Feldstärken von mehr als 35 MV/m erreicht haben, die experimentellen Untersuchungen von Störwellenfeldern in rauen Strahlrohren, die Arbeiten zur elektro-optischen Abtastung von Teilchenpaketen in Beschleunigern, wo Zeitauflösungen unterhalb von 1 ps erreicht werden konnten und die Messung der Kohärenz der FEL-Strahlung an der TTF (TESLA Test Facility). Im Jahre 2003 wurde die Gruppe durch technische Mitarbeiter des zu Ende gegangenen HERA-B Experiments verstärkt.

Theorie

Die Schwerpunkte des wissenschaftlichen Programms der Theoriegruppe, die eng mit dem II. Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg sowie den experimentellen Gruppen des DESY zusammenarbeitet, waren: HERA-Physik und die Theorie der

starken Wechselwirkung, Gittereichtheorie, die Physik schwerer Quarks, Physik an Hochenergie-Collidern, Neutrino-Physik und Kosmologie, vereinheitlichte Theorien, Stringtheorie und Quantengravitation.

Technische Gruppen und Fortbildung

Am 30. Juni 2003 wurde der Z-Bereich (Zentrale Technische Dienste) aufgelöst. Der Bereich FH (Forschung Hochenergiephysik) wurde in Hamburg durch die Gruppen IT (Informationstechnologie), IPP (Informationsmanagement, Prozesse Projekte) und ZE (Servicezentrum Elektronik) vergrößert. Die Eingliederung der Gruppen verlief, dank der bereits bestehenden guten Zusammenarbeit und regelmäßiger Informations- und Arbeitstreffen, weitgehend reibungslos. In Treffen mit den Leitern der Projekte PETRA III und Vorbereitung des europäischen X-FEL Labors wurde die Mitarbeit der zentralen Gruppen an Arbeitspaketen dieser Projekte vereinbart. Für Informationen über die in den Gruppen durchgeführten Arbeiten verweisen wir auf die Berichte der einzelnen Gruppen (siehe Abschnitt „Zentrale Dienste“, S. 261ff).

Die Ausbildung im IT-Bereich wurde 2003 weiter ausgebaut. Insgesamt wurden 14 IT-Auszubildende betreut. Neben der Benutzerunterstützung führen die Gruppen IT und IPP umfangreiche Schulungsprogramme durch.

Die Aufgabe der Stabsstelle FORT ist die Fortbildung der DESY Mitarbeiter. Beispiele für das reichhaltige Angebot sind die Fortbildungskolloquien sowie Kurse zur Mitarbeiterführung, zum Projektmanagement, zur Kommunikation, zur Gesprächsführung und, in Zusammenarbeit mit der Frauenvertretung, zur Chancengleichheit. Besonderes Interesse finden auch Sprachkurse für DESY Mitarbeiter, die die Kommunikation mit den ausländischen Gästen erleichtern, sowie Deutschkurse für ausländische Gäste und deren Familienangehörige.

Bibliothek

Die Gruppe „Bibliothek und Dokumentation“ sammelt die von den DESY-Mitarbeitern und Gästen benö-

tigte Fachliteratur und beschafft Lehrbücher und Monographien. In enger Zusammenarbeit mit der Bibliothek des SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) ist sie für die Literaturdatenbank HEP (High Energy Physics), die praktisch von allen Teilchenphysikern verwendet wird, verantwortlich. Die Gruppe verwaltet auch das Berichts- und Veröffentlichungswesen von DESY und nimmt die Aufgaben des „Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron“ wahr. Die DESY-Zentralbibliothek bildet Fachangestellte für Medien- und Informationsdienste der Fachrichtung Bibliothek aus und stellt Praktikumsplätze für Studenten des Bibliothekswesens zur Verfügung. (Mehr zur Bibliothek siehe Seite 263ff)

Schülerpraktikum und Begabtenförderung

Das Schülerprojekt physik.begreifen@desy.de war auch 2003 wieder ausgebucht: 170 Schulklassen besuchten die beiden Praktika „Vakuum“ und „Radioaktivität“. Dank der Qualität der Versuche und der ausgezeichneten Betreuung (gefördert durch die Hamburger Schulbehörde und den HGF-Präsidentenfonds) erfreut sich das Programm ungebrochener Beliebtheit. So konnte am 4. April die Teilnahme des 10 000sten Schülers am Praktikumsangebot von „physik.begreifen“ gefeiert werden. Der Klasse wurde eine Urkunde überreicht und sie erhielt neben einem kleinen Präsent eine Sonderführung in den HERA-Tunnel.

Im Februar/März 2003 wurde das Schüler-Vakuumlabor für fünf Wochen nach DESY-Zeuthen verlegt. Dies galt als Testphase für ein Schülerlabor in Zeuthen, dessen Einweihung im Frühjahr 2004 sein wird.

In den Sommerferien bot „physik.begreifen“ wieder Praktikumstage im Rahmen des Hamburger Ferienpasses an. Die acht- bis zwölfjährigen Kinder bekamen die Gelegenheit im Vakuumlabor zu experimentieren, während die begleitenden Erwachsenen eine Führung über das DESY-Gelände genossen. Beim abschließenden „Jahrmarkt“ am Nachmittag stellten die kleinen Forscherinnen und Forscher ihren Eltern die Experimente vor – diese Mischung war ein voller Erfolg.

2003 fand außerdem ein erster Kurs für Erzieher statt. Gerade im Kindergartenalter ist der Forscherdrang riesengroß und bietet eine gute Basis, um die Kinder spielerisch mit physikalischen Zusammenhängen vertraut zu machen. 2004 wird diese Fortbildung auch für Grundschullehrkräfte angeboten.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde eine Nebelkammer mit integriertem Magnetfeld aufgebaut. Damit wurde ein erster Baustein für die Erweiterung des Praktikumsangebots auf Klassen der Oberstufe fertig gestellt. Mit der Nebelkammer sollen die Schüler Versuche zum Teilchennachweis und zu den Eigenschaften von Elementarteilchen durchführen (Finanzierung durch den HGF-Präsidentenfonds).

Im Programm „Faszination Physik“ setzen sich Schüler mit Fragen der modernen Physik auseinander. Das Programm besteht nun seit 5 Jahren. Aus diesem Anlass haben Schüler von „Faszination Physik“ ihrem Lehrer Herrn Dr. W. Tausendfreund ein Buch überreicht, in dem sie eindrucksvoll ihr Wissen zur modernen Physik dokumentieren. Während der Schulzeit werden einmal pro Monat von Teilnehmern von „Faszination Physik“ Vorträge zu physikalischen Themen am Institut für Lehrerfortbildung gehalten.

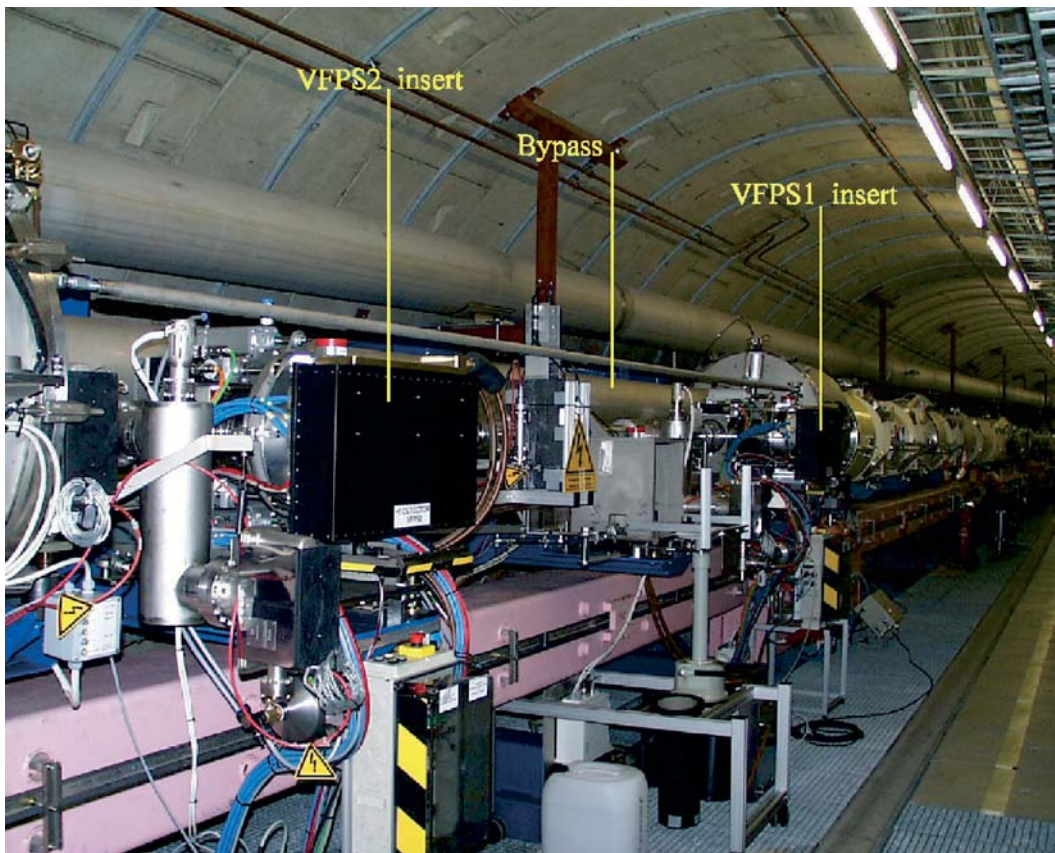


Abbildung 3: Das neue H1 Vorwärts-Proton-Spektrometer (VFPS) nach dem Einbau in den HERA-Tunnel. Die beiden „Roman Pot“-Stationen befinden sich in einer Entfernung von mehr als 200 m vom H1-Detektor und dienen dem Nachweis von gestreuten Protonen in einem bisher nicht erschlossenen kinematischen Bereich.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

H1 Experiment

Beteiligte Institute: RWTH Aachen, Univ. Antwerpen, Univ. of Birmingham, Inter-Univ. ULB-VUB Brussels, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Inst. for Nucl. Phys. Cracow, Univ. Dortmund, JINR Dubna, CEA Saclay, DESY und Univ. Hamburg, Univ. und MPI Kernphys. Heidelberg, Univ. Kiel, Slovak Acad. Sci. Košice, Univ. of Lancaster, Univ. of Liverpool, QMWC London, Univ. of Lund, Univ. of Manchester, Univ. Marseille, CINVESTAV Merida und Mexico, ITEP und Lebedev Inst. Moscow, MPI Phys. München, Univ. de Paris-Sud Orsay, Ec. Polytech. Palaiseau, Univ. Paris VI und VII, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: M. Klein, DESY

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

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

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

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

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

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

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

Der H1-Detektor

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

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

Untergrundreduktion

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

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

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

Reparaturen

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

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

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

Neuinstallationen

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

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

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

Physikalische Ergebnisse

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

Messungen bei hohen Q^2

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

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

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

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

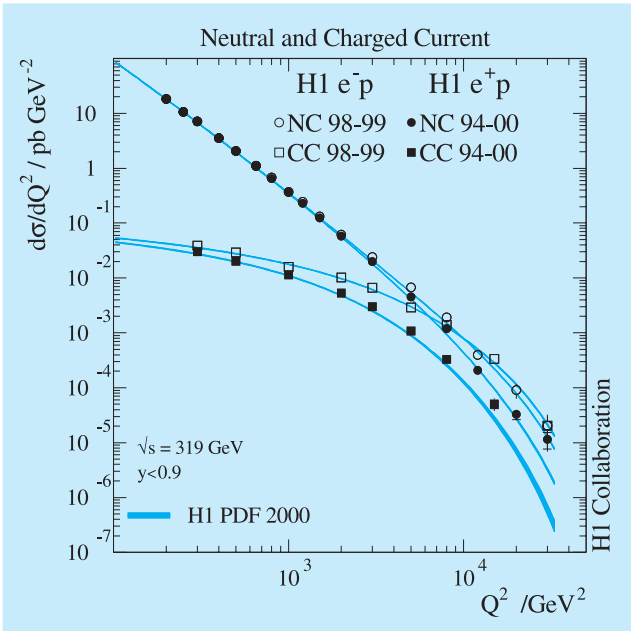


Abbildung 4: Q^2 -Abhängigkeit der inklusiven Streuquerschnitte des geladenen (CC) und des neutralen (NC) Stroms für Elektron- und Positron-Proton-Streuung durch das H1-Experiment. Die Daten (Symbole mit Fehlerbalken) werden durch die theoretischen Rechnungen im Standardmodell der elektroschwachen sowie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

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

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

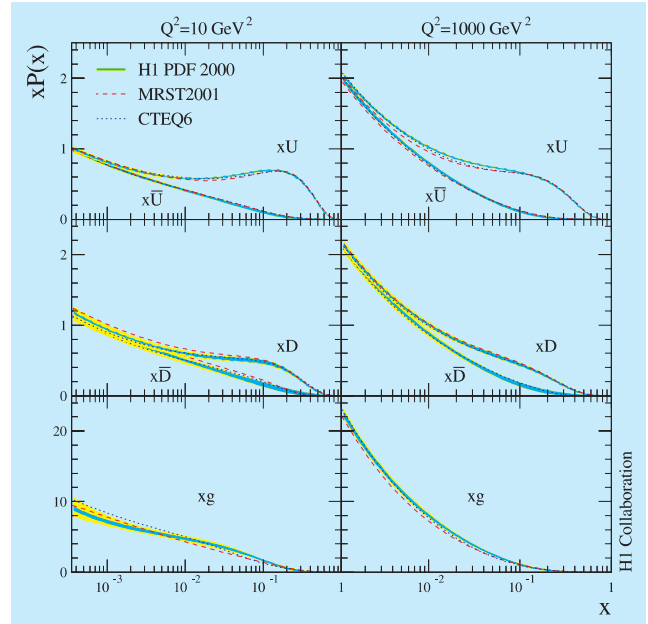


Abbildung 5: Quarkverteilungen xU und $x\bar{U}$, xD und $x\bar{D}$ sowie Gluonverteilung xg , wie sie aus den H1-Daten in nächstführender Ordnung der QCD bestimmt wurden (H1 PDF 2000). Der Vergleich der linken mit den rechten Abbildungen verdeutlicht den großen Einfluss der Q^2 -Evolution, die die QCD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

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

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

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

Jets und QCD

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

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

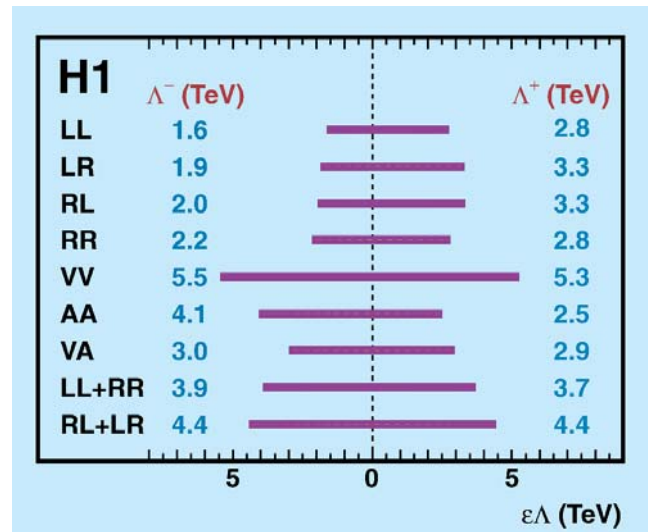


Abbildung 6: Die durch NC-Daten mit 95% Wahrscheinlichkeit ausgeschlossenen Bereiche des Skalenparameters Λ für unterschiedliche Kopplungsstrukturen einer angenommenen Kontaktwechselwirkung, gezeigt jeweils für den Fall konstruktiver (Λ^+) und destruktiver (Λ^-) Interferenz.

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

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

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

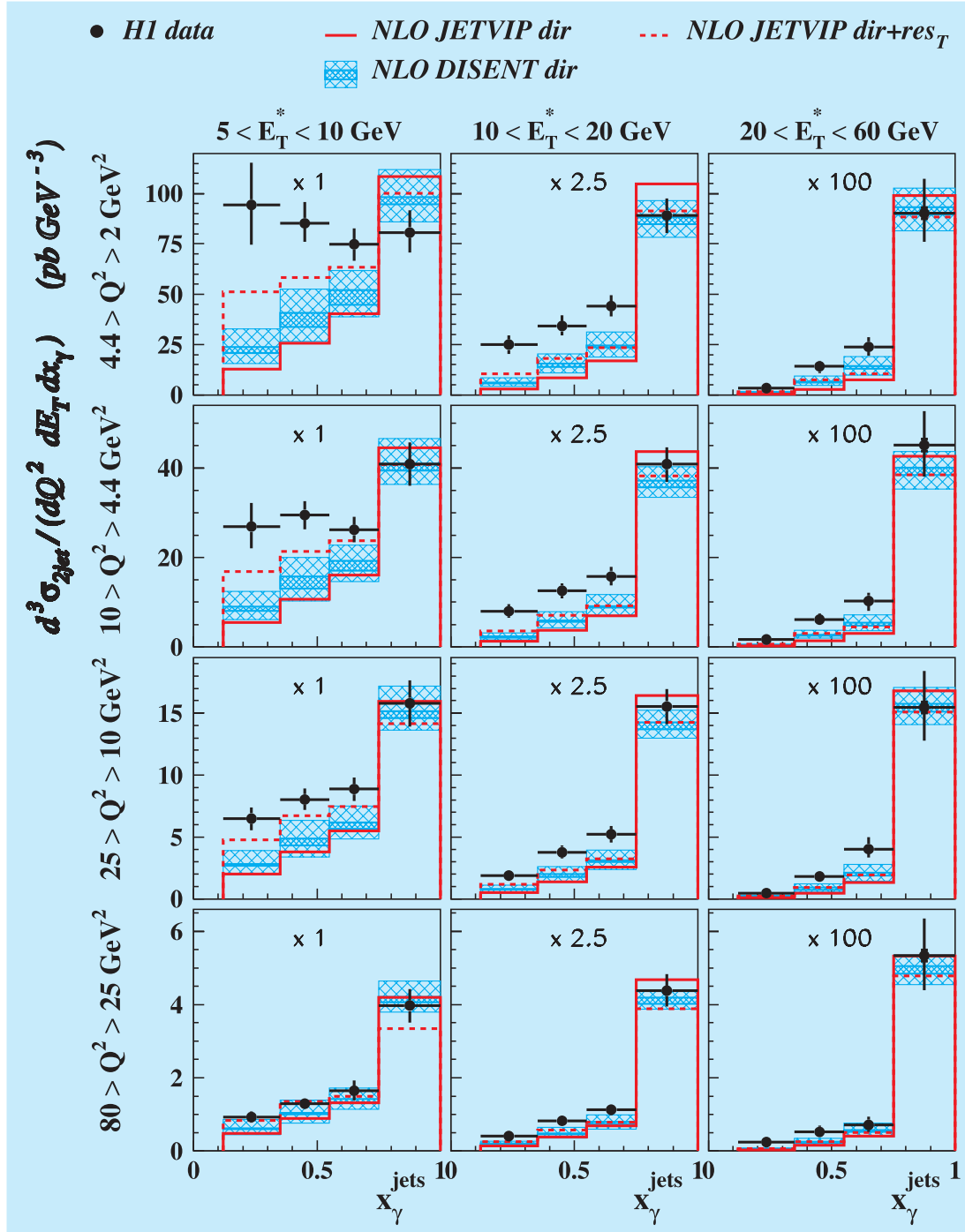


Abbildung 7: Wirkungsquerschnitte für 2-Jet-Produktion als Funktion des relativen Partonimpulses x_γ^{jets} im Photon für drei Bereiche der transversalen Jet-Energie E_T^* und vier Bereiche des quadrierten Impulsübertrages Q^2 . Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen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

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

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

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

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

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

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

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

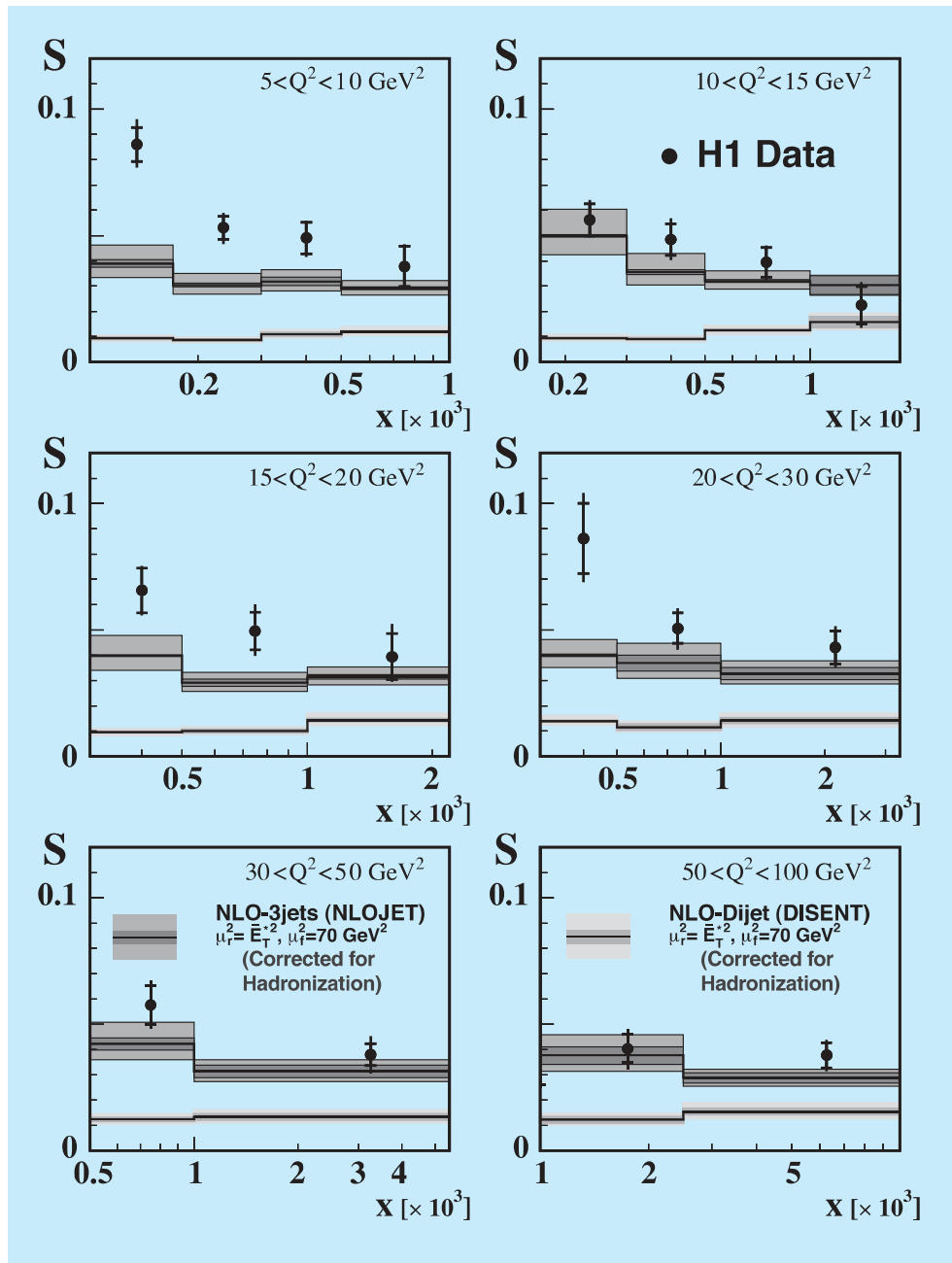


Abbildung 8: Das Verhältnis S von 2-Jet-Ereignissen mit Jet-Jet Azimutwinkel $< 120^\circ$ zu allen 2-Jet-Ereignissen, als Funktion des Anteils x am Protonimpuls in sechs Bereichen des quadrierten Impulsübertrages Q^2 . Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen der QCD in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

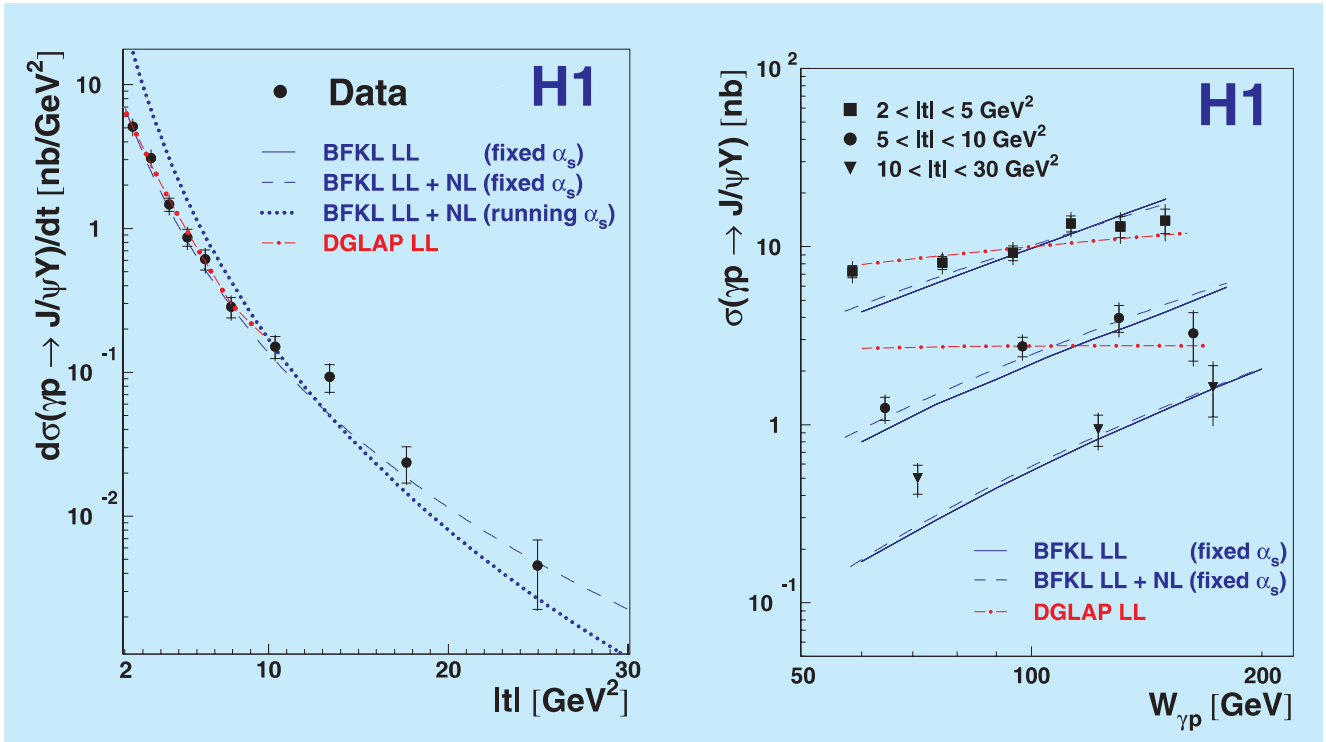


Abbildung 9: Photon-Proton Wirkungsquerschnitt für J/ψ -Photoproduction, als Funktion des quadrierten Proton-Impulsübertrages $|t|$ (links) und der invarianten Photon-Proton-Energie $W_{\gamma p}$ in drei Bereichen von $|t|$ (rechts). Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen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

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

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

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

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

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

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

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

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

Physik jenseits des Standardmodells

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

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

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

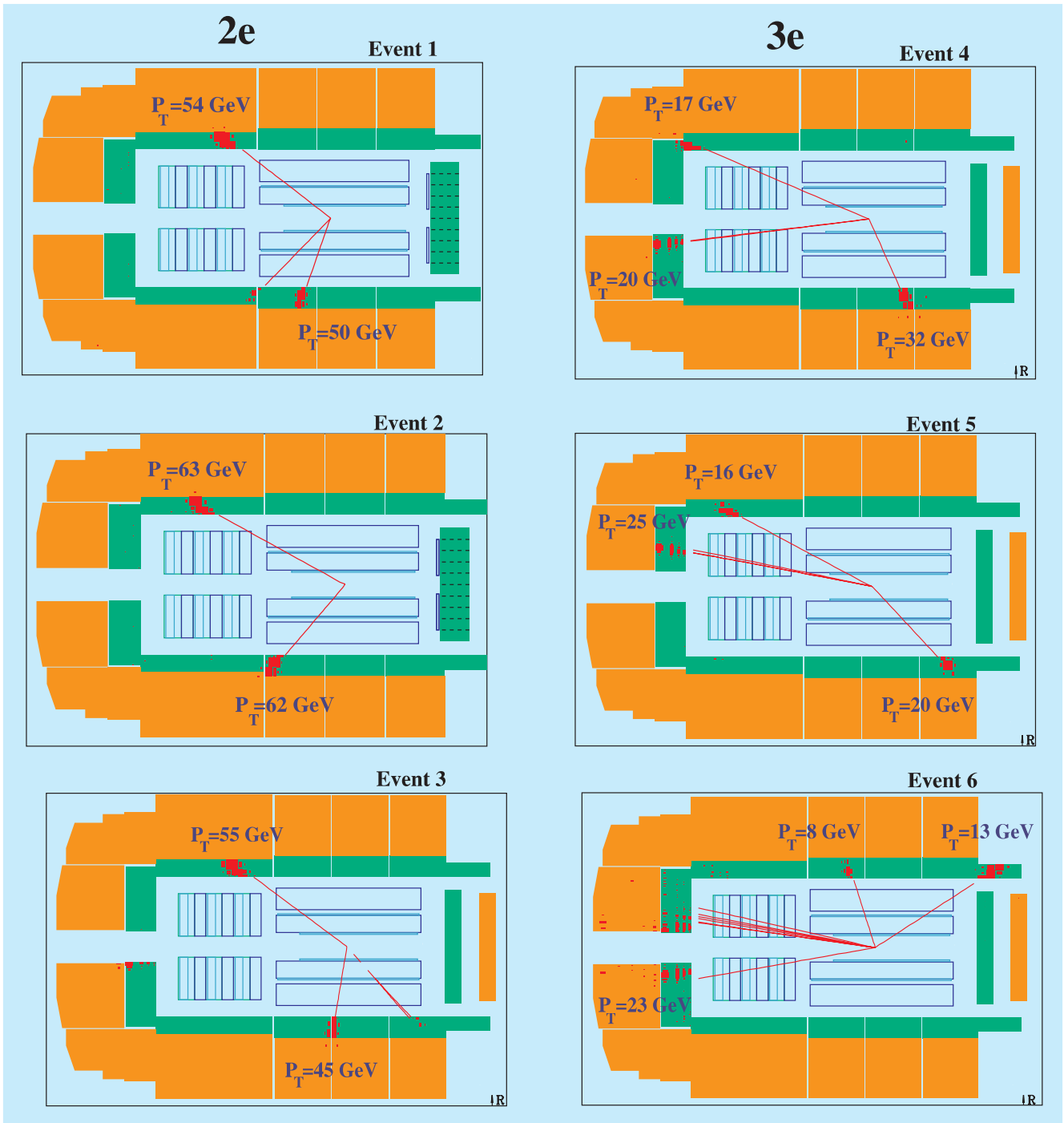


Abbildung 10: Die im H1-Detektor nachgewiesenen drei „2e“- (links) und drei „3e“-Ereignisse (rechts) mit $M_{12} > 100$ GeV in der Seitenansicht. In den „3e“-Ereignissen wurde die invariante Masse M_{12} für die beiden Elektronen mit größtem Transversalimpuls berechnet.

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

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

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

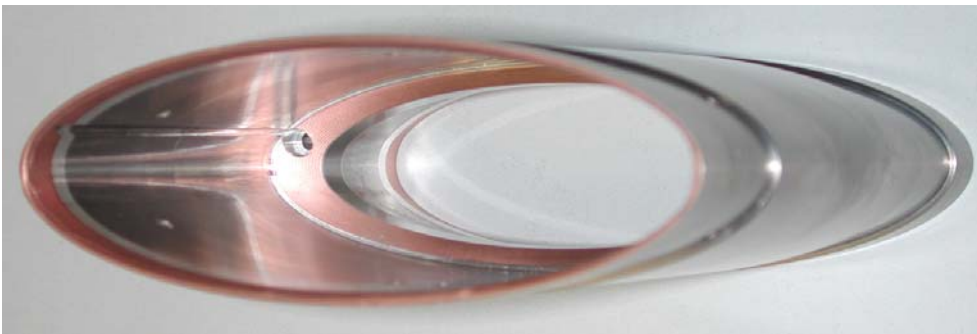


Abbildung 11: Synchrotronstrahlungsabsorber von ZEUS, der 80 cm vom Wechselwirkungspunkt in Leptonstrahlrichtung montiert ist. Der Absorber besteht aus einer Wolframlegierung, die auf der der reflektierten Synchrotronstrahlung zugewandten Flächen mit Silber und Kupfer beschichtet ist um Rückstreuung 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 Datennahmebetrieb 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 Kollimatorsystem 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 strahlaufwärts 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 strahlfreie 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 Kühlung 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 Polarisierung 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 genommener 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 Streuereignisse. Allerdings sind diese Streuereignisse 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 Streuereignissen, 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 Streuereignissen durchsucht. Dabei werden unterschiedliche

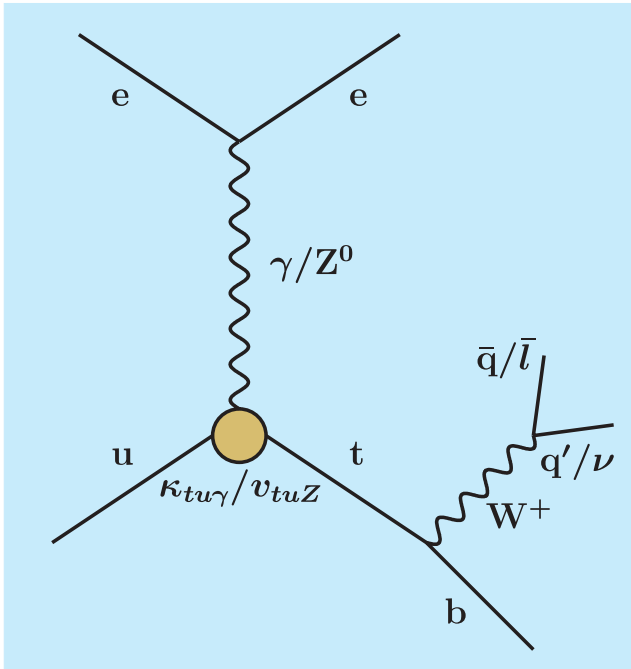


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Produktionsprozesses von top-Quarks bei HERA.

Zerfallsketten des t-Quarks berücksichtigt: Zunächst sucht man nach dem so genannten leptonischen 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

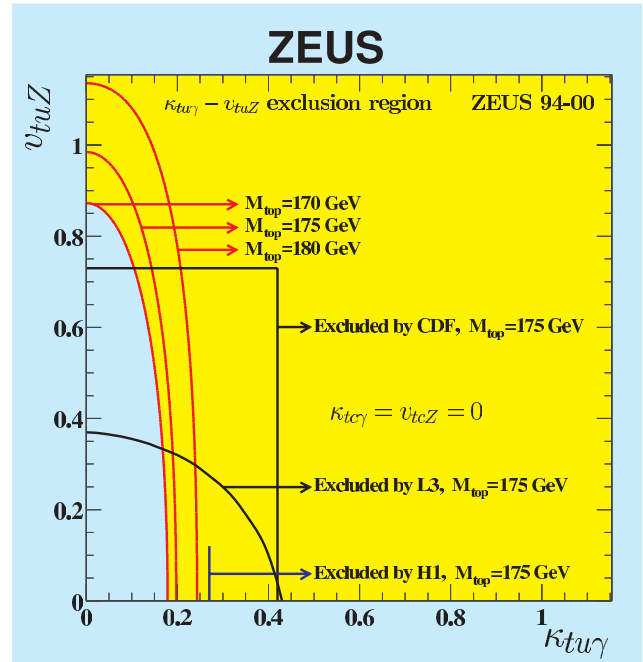


Abbildung 13: Grenzwerte für die Kopplungen des FCNC Prozesses, die mit den Beobachtungen mit 95% Wahrscheinlichkeit verträglich sind.

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 κ_{tuy} und ν_{tuz} (< 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 Streuereignis 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

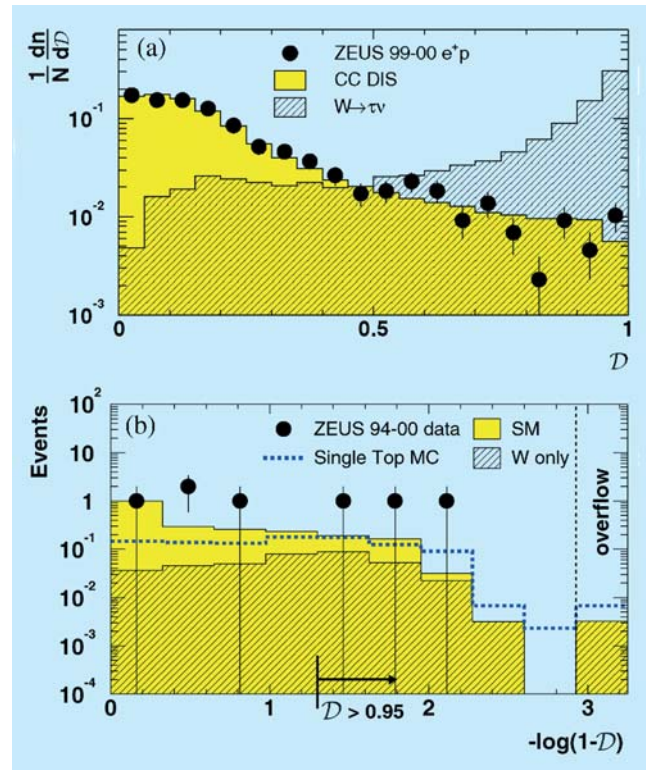


Abbildung 14: Verteilung der Werte der τ -Diskriminante für ZEUS Daten und für Simulationsergebnisse, einmal ausschließlich für den Prozess des Geladenen Stromes, in dem kein τ vorkommt, und für den Zerfall von schweren W-Bosonen in ein τ und das entsprechende Neutrino.

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 tiefinelastischen 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-

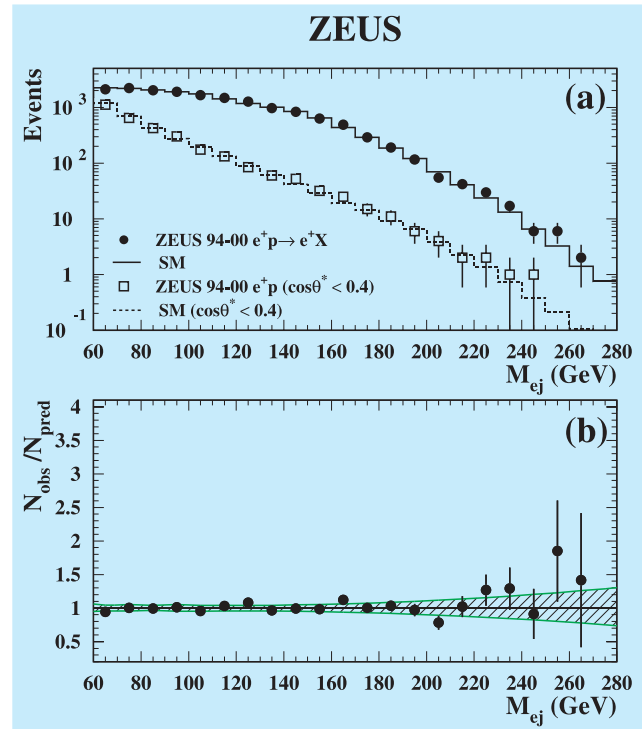


Abbildung 15: (a) Massenverteilung M_{ej} für den Prozess $e^+p \rightarrow e^+X$ mit und ohne Beschränkung von $\cos \theta^*$. (b) Anzahl der beobachteten geteilt durch die Anzahl der gemäß Standardmodell erwarteten Ereignisse.

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

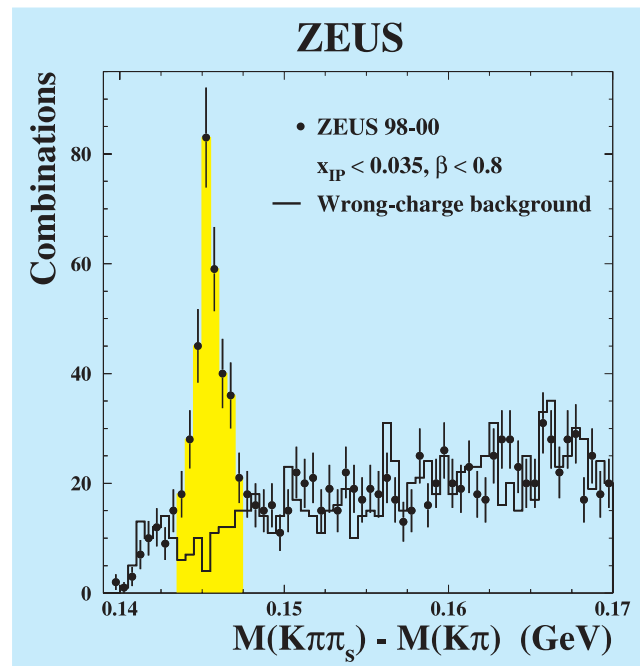


Abbildung 16: Verteilung der invarianten Massendifferenz von D^* und D^0 -Meson im Zerfallskanal $D^*(2010)^+ \rightarrow D^0 \pi^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ (bzw. ladungskonjugiert) in Diffraktiver Streuung.

(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-

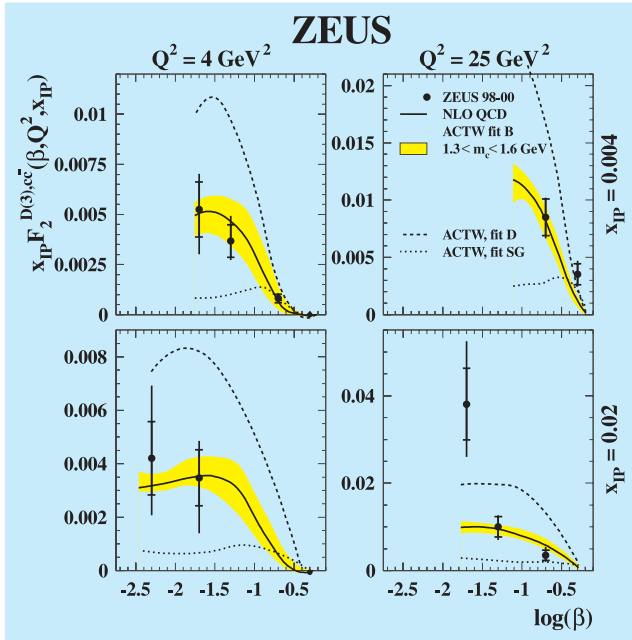


Abbildung 17: Die diffraktive Charm Strukturfunktion $F_2^{D(3),c\bar{c}}$.

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-

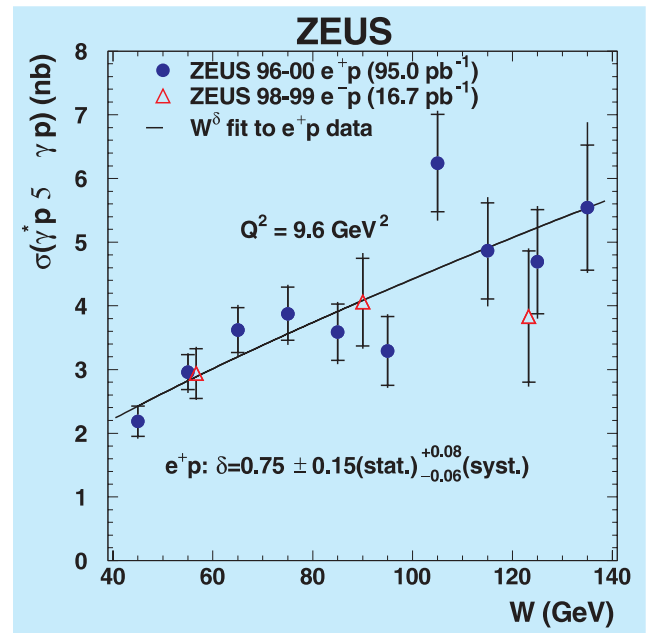


Abbildung 18: Der Wirkungsquerschnitt für tiefunelastische virtuelle Comptonstreuung, $\gamma^* p \rightarrow \gamma p$, als Funktion der Energie des γp Systems.

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 Streuereignissen 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 Untergrundereignissen zu optimieren.

Abbildung 19 zeigt die Verteilung der Fisher-Diskriminante t der vorselektierten Streuereignisse. Die mit DJANGO 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

ZEUS

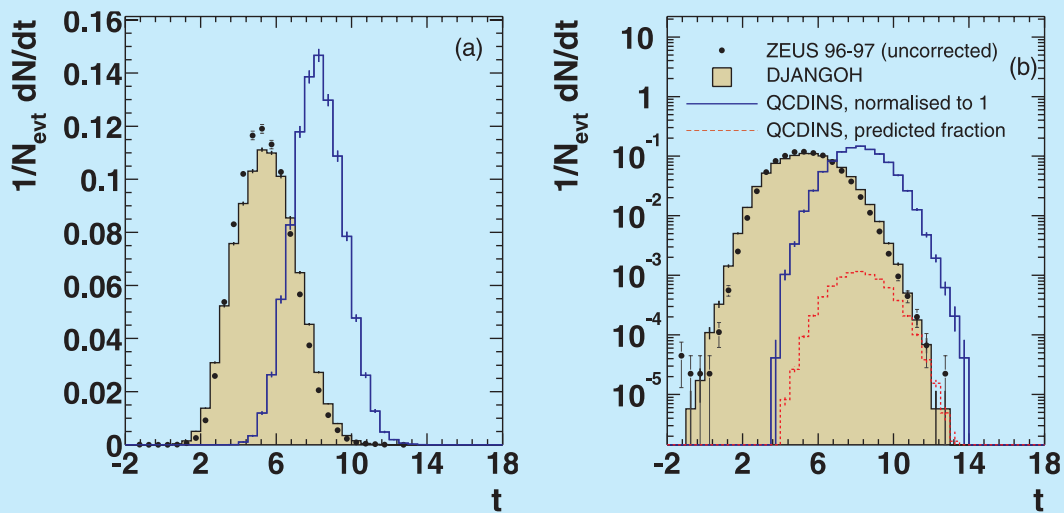


Abbildung 19: Fisher-Diskriminante für tiefunelastische Streueignisse nach einer Vorselektion, einmal auf einer linearen (a) und einmal auf einer logarithmischen Skala (b). Die Datenpunkte sind die Resultate der ZEUS-Messung. Die mit DJANGOH gekennzeichnete Verteilung zeigt die theoretische Erwartung 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.

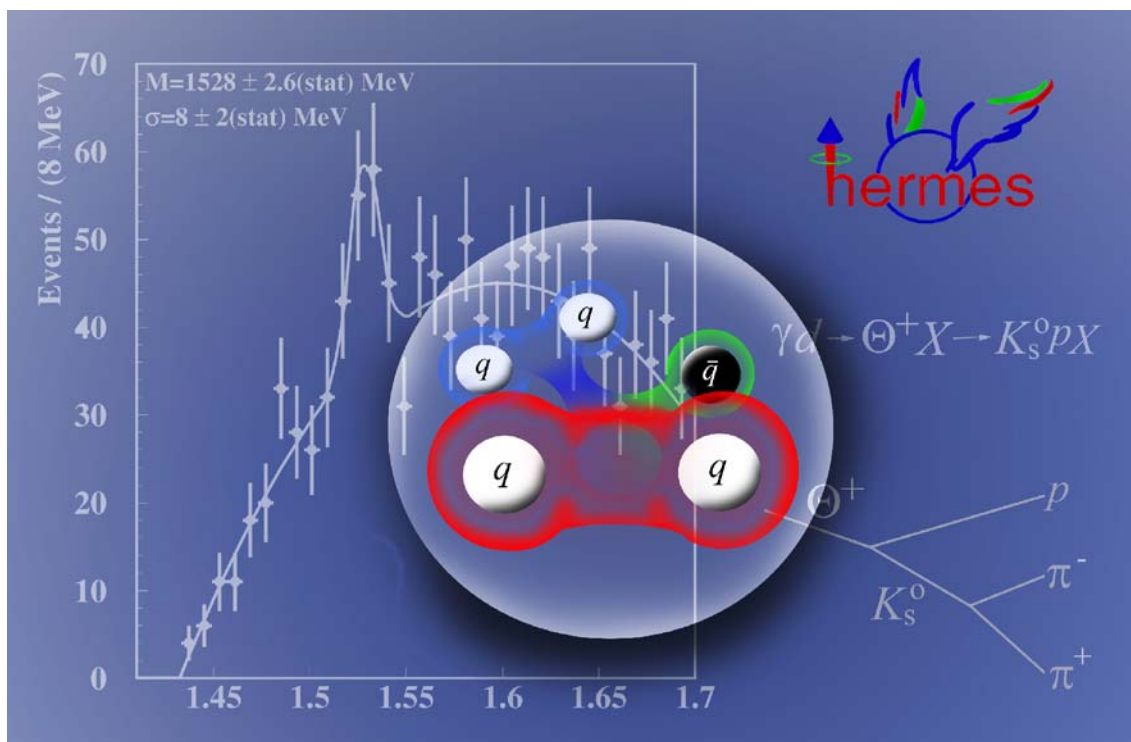


Abbildung 20: Eine schematische Darstellung des Bildungsprozesses für „Pentaquarks“.

HERMES Experiment

Beteiligte Institute: NIKHEF und Vrije Universiteit Amsterdam, Univ. of Michigan Ann Arbor, ANL Argonne, Univ. und INFN Bari, Beijing Univ., Univ. of Colorado Boulder, Simon Fraser Univ. Burnaby, MIT Cambridge, JINR Dubna, Univ. of Alberta Edmonton, Univ. Erlangen-Nürnberg, Univ. und INFN Ferrara, INFN Frascati, Univ. Gent, Univ. Gießen, Univ. Glasgow, DESY Hamburg, Univ. Sci. Technol. Hefei, P. N. Lebedev Inst. Moscow, IHEP Protvino, Univ. Regensburg, INFN und Ist. Sup. Sanità Rome, St. Petersburg Nucl. Phys. Inst., Tokyo Inst. Technol., Univ. of Illinois Urbana-Champaign, TRIUMF Vancouver, Andrzej Soltan Inst. Warsaw, Yerevan Phys. Inst., DESY Zeuthen

Sprecherin: E.C. Aschenauer, DESY

Trotz der langwierigen Inbetriebnahme von HERA konnte HERMES bereits erfolgreich in 2002 und 2003 Daten mit einem transversal polarisierten Wasserstofftarget nehmen (Abb. 21). Diese Daten ermöglichten zum ersten Mal überhaupt, die semi-inklusiven azimuthalen Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien von Pionen zu extrahieren, ein entscheidender Schritt auf dem Weg zur Messung der Verteilungsfunktionen von transversal polarisierten Quarks im Proton. Dies soll auch für das Jahr 2004 der Schwerpunkt der HERMES-Datennahme sein.

Ein weiterer Schwerpunkt in der Datenanalyse war die Fortführung der Untersuchung von exklusiven Prozessen. Sie erlauben, wie bereits in vorherigen Jahresberichten beschrieben, die Bestimmung der verallgemeinerten Partonverteilungsfunktionen (GPD). Um ein vollständiges Bild zu erhalten, ist es wichtig, GPDs auch am Neutron zu studieren. HERMES hat dafür die Produktion von reellen Photonen (Tiefvirtuelle Compton Streuung) nicht nur an einem Protonentarget sondern auch an einem Deuteriumtarget untersucht. Um exklusive Prozesse noch genauer studieren zu können, soll das HERMES-Spektrometer durch einen Detektor zum Nachweis und zur Identifizierung der langsamen Rückstoßprotonen erweitert werden. Es werden Details zur Spurerkennung und Teilchenidentifikation von minimal-ionisierenden Teilchen mit einem Detektor aus szintillierenden Fasern beschrieben.

Die überraschende Entdeckung eines neuen Bindungszustand von Quarks, bestehend aus 5 Quarks, durch das LEPS Experiment bei SPring-8, konnte auch vom HERMES-Experiment mit einer Signifikanz von 4 Standardabweichungen bestätigt werden. Dafür suchte man bei HERMES in den in

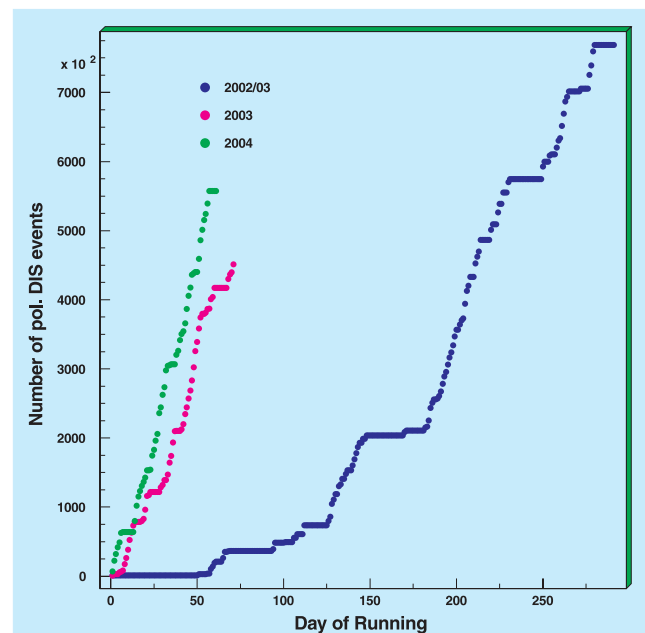


Abbildung 21: Von HERMES aufgenommene polarisierte tiefinelastische Streueignisse seit dem Beginn von HERA-II.

RUN-I aufgenommenen Deuteriumdaten nach Ereignissen mit einem Proton und einem neutralen Kaon, die zusammen eine Masse von 1530 MeV ergeben.

Physikalische Ergebnisse

Polarisiertes Target

Transversity und Siversfunktion

Die Untersuchung der Spinstruktur der Nukleonen ist die wichtigste Aufgabe des HERMES-Experiments. Nachdem HERMES während seiner ersten Datennahmepériode Streuereignisse an einem longitudinal polarisierten Target gemessen und daraus weltweit einzigartig die einzelnen Beiträge der verschiedenen Quarksorten zum Gesamtdrehimpuls des Nukleons extrahiert hat, nimmt HERMES seit 2002 Daten mit einem transversal, d. h. senkrecht zur Strahlrichtung polarisierten Wasserstofftarget. Dies ermöglicht die Messung der letzten in führender Ordnung verbleibenden Quarkverteilung im Proton, der „Transversity“ Verteilung.

Die komplette Beschreibung der Struktur des Nukleons in der Theorie der starken Wechselwirkung verlangt nach drei fundamentalen Quarkverteilungen: der unpolarisierten Quarkverteilung, die z. B. mit höchster Präzision an den HERA-Schwesterexperimenten ZEUS und H1 gemessen wurde, der Helizitätsverteilung, die – wie oben schon angesprochen – Hauptergebnis der ersten HERMES-Datennahme war, und der Transversity Verteilung. Diese beschreibt die Differenz der Wahrscheinlichkeitsdichten der Quarks mit Spin in der gleichen bzw. entgegengesetzten Richtung zum Spin des Nukleons, wobei das Nukleon transversal, d. h. senkrecht zu seiner Bewegungsachse, polarisiert ist. Dies ist der wesentliche Unterschied zur Helizitätsverteilung, bei der das Nukleon entlang der Bewegungsrichtung polarisiert ist.

In Abwesenheit von relativistischen Einflüssen stimmen die Helizitätsverteilung und die Transversity Verteilung überein. Ein Unterschied in den beiden Verteilungen ist daher ein Maß dessen, wie stark relativistische Effekte bei der Beschreibung der Nukleonstruktur berücksichtigt werden müssen. Außerdem

gibt es ein Teilgebiet der theoretischen Physik, das sich intensiv mit der Berechnung von Quarkverteilungen beschäftigt. Die Transversity Verteilung sollte mit den Methoden der Gittertheorie sehr zuverlässig berechnet werden können. Eine experimentelle Überprüfung von deren Ergebnissen ist daher von immenser Bedeutung.

Die Verwendung eines transversal polarisierten Targets ermöglicht es aber auch, noch andere Effekte zu studieren. Eine Erweiterung der klassischen Beschreibung der Nukleonstruktur beinhaltet die Berücksichtigung des transversalen Impulses der Quarks. Dies erlaubt die Einführung einer neuen Klasse von Verteilungsfunktionen: die Verteilungen hängen nicht mehr nur vom Impulsbruchteil x ab, sondern auch vom transversalen Impuls $p_{\perp}$ der Quarks. Integriert man über den transversalen Impuls, fallen diese Beiträge zum Streuquerschnitt wieder heraus, es verschwindet ja auch der Gesamtbetrag des transversalen Impulses. Übrig bleiben dann wieder die drei oben aufgezählten Verteilungen.

Eine besonders interessante $p_{\perp}$ -abhängige Verteilung ist die Siversfunktion. Sie beschreibt die Verteilung unpolarisierter Quarks in einem transversal polarisierten Nukleon. Das Interesse an ihr ist sehr groß, zum einen weil mit ihr viele bisher unerklärte experimentelle Ergebnisse von Hadron-Hadron-Kollisionen verstanden werden könnten, zum anderen aber auch wegen ihres Verhaltens unter Zeitumkehr. Die Theorie der starken Wechselwirkung ist eigentlich gerade unter Zeitumkehr, trotzdem verhält sich die Siversfunktion wie eine ungerade Funktion, d. h. sie wechselt ihr Vorzeichen. Dieses seltsame Verhalten hielt man bis vor kurzem eigentlich für ausgeschlossen. Neue Erkenntnisse lassen jedoch so etwas in der Theorie nun zu. Es wäre daher sehr interessant zu sehen, ob es nur Gedanken-spiele sind, oder ob die Siversfunktion wirklich existiert. Ein Nebengedanke dazu ist, dass die Siversfunktion nur in Zusammenhang mit einem nicht verschwindenden Bahndrehimpuls der Quarks im Nukleon existieren kann, das heißt eventuell erhält man durch die Siversfunktion Hinweise zur Lösung eines verbleibenden Rätsels der Spinstruktur des Nukleons. Bisher kann der Gesamtdrehimpuls des Nukleons nicht allein durch den Spin der Quarks erklärt werden. Andere Beiträge, z. B. vom Bahndrehimpuls der Quarks, müssen noch gemessen werden.

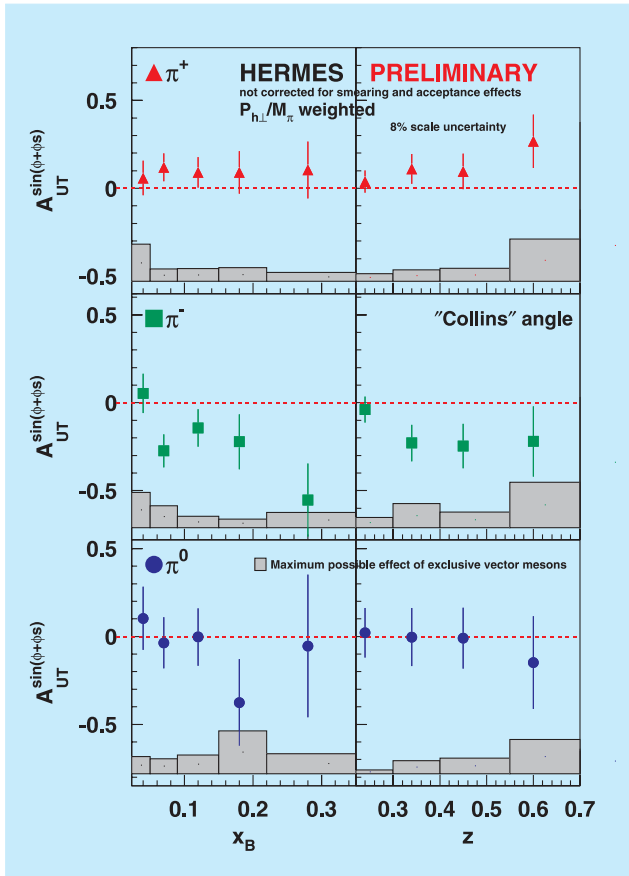


Abbildung 22: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusiven azimuthalen Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien von Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im so genannten Collinswinkel, welche proportional zur Transversity Verteilung sind.

Eine Gemeinsamkeit in der Messung der Transversity Verteilung und der Siversfunktion ist die Erfordernis, semi-inklusive Streuereignisse zu messen. Im Gegensatz zu inklusiven Messungen, bei denen nur das gestreute Lepton nachgewiesen werden muss, benötigt man bei semi-inklusiven Ereignissen auch noch den zusätzlichen Nachweis von Hadronen aus dem Fragmentationsprozess. Durch das Umdrehen der Spinrichtung des Nukleons kann eine Asymmetrie in der Zählrate dieser Ereignisse gebildet werden, wobei diese Asymmetrie von den azimuthalen Winkeln des untersuchten Hadrons und des Spinvektors mit der Streuebene abhängt. Da die obigen Verteilungen unterschiedliche Winkelabhängigkeiten aufweisen, kann

man sie gleichzeitig mit demselben Datensatz untersuchen.

In Abbildung 22 sieht man die weltweit ersten durch die Transversity Verteilung verursachten Asymmetrien für geladene sowie neutrale Pionen von einem transversal polarisierten Protontarget. Dargestellt sind sie als Funktion von x_B und als Funktion von z , dem Impulsbruchteil des virtuellen Photons, welchen das nachgewiesene Hadron trägt. Auffällig ist die große negative Asymmetrie für negativ geladene Pionen. Dies kommt etwas überraschend, vor allem, wenn man ein ähnliches Verhalten wie das der Asymmetrien an einem longitudinal polarisierten Target erwartet hatte. Da bei diesen Asymmetrien noch nicht gemessene Fragmentationsfunktionen eine Rolle spielen, die bei den longitudinalen Asymmetrien nicht vorkamen, kann man aus diesem Ergebnis

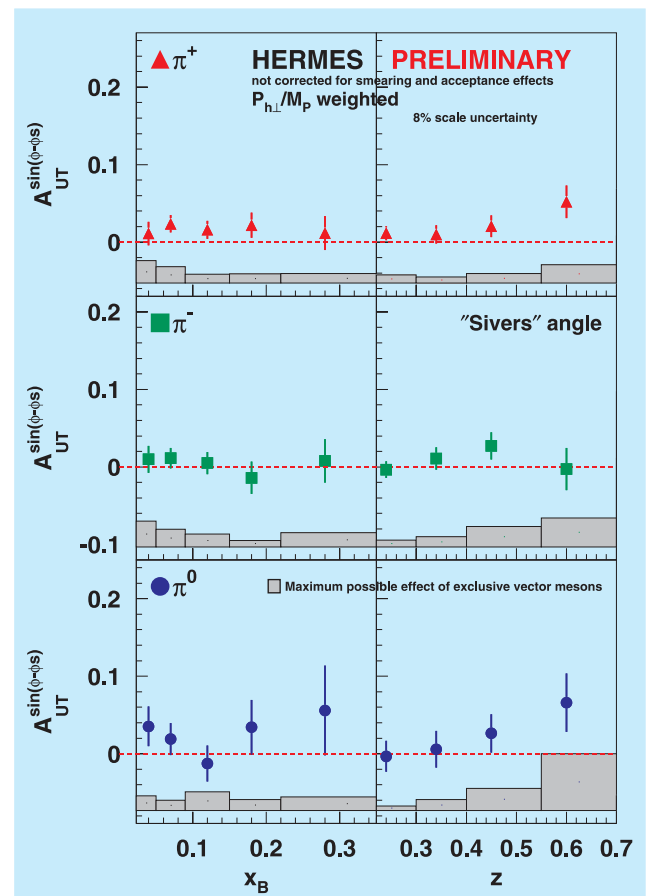


Abbildung 23: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu den Siversasymmetrien für Pionen von einem transversal polarisierten Wasserstofftarget.

eventuell Rückschlüsse auf deren Verhalten ableiten. Jedoch ist die statistische Signifikanz der Ergebnisse zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht gut genug, um konkrete Aussagen zu machen. Auch der systematische Fehler ist noch recht groß. Dieser stammt vor allem von Untergrundereignissen, die durch die begrenzte Akzeptanz des Detektors nicht eindeutig identifiziert werden können.

Abbildung 23 zeigt die gemessenen Sivers-Asymmetrien. Auch hier ist die Messung noch durch die geringe Statistik begrenzt. Jedoch gibt es, zumindest für positiv geladene Pionen, einen Trend zu positiven Asymmetrien. Dies wäre der erste Nachweis von Verteilungsfunktionen, die ungerade unter Zeitumkehr sind.

Diese ersten Ergebnisse, die aus Daten von einem für HERA schwierigen Jahr stammen, sind erst der Anfang des Programms mit einem transversal polarisierten Target. Die zusätzlichen Daten, die zur Zeit genommen werden, verbessern die statistische Signifikanz der Ergebnisse, so dass konkretere Aussagen über die Transversity Verteilung gemacht werden können. Außerdem wird sich zeigen, ob es wirklich eine von Null verschiedene Siversfunktion gibt.

Unpolarisierte Targets

Tiefvirtuelle Compton-Streuung an Kernen

Schnelle Elektronen strahlen beim Durchgang durch Materie hochenergetische Lichtquanten ab. Dieser Prozess ist als Bremsstrahlung bekannt und wird im Wesentlichen durch die Abbremsung der Elektronen im elektromagnetischen Feld der Atomkerne erzeugt (Bethe-Heitler-Prozess).

Bei sehr hohen Elektronenergien kann ein vollkommen anderer Prozess, nämlich Tiefvirtuelle Compton-Streuung (DVCS), zum selben Endzustand führen. Das Lichtquant wird hierbei aber nicht vom Elektron, sondern von einem Quark im Inneren des Kerns emittiert.

In beiden Fällen kann der Kern im Grundzustand verbleiben, in einen angeregten Zustand übergehen oder in verschiedene Fragmente zerplatzen. Die dominanten Reaktionen sind jedoch der kohärente, elastische Stoß am Kern als Ganzes oder der inkohärente, quasi-

elastische Stoß an einem seiner Nukleonen, das heißt Protonen oder Neutronen.

Für die typische Reaktionskinematik bei HERMES ist normale Bremsstrahlung deutlich wahrscheinlicher als DVCS, es kommt aber zu einer quantenmechanischen Interferenz der Prozesse. Auf diese Weise sind die beobachteten Effekte viel größer, als die reine Reaktionswahrscheinlichkeit für DVCS erwarten ließe. Insbesondere können in der Reaktionsrate Asymmetrien beobachtet werden, die von der Ladung des Strahlteilchens, das heißt Elektron oder Positron, oder der Spinausrichtung von Strahlteilchen und Kern abhängen, wobei der jeweils andere Reaktionspartner unpolarisiert ist. Solche Asymmetrien sind durch Bremsstrahlung allein nicht erklärbar und deshalb ein eindeutiges Indiz für neue und interessante Physik.

Seit einigen Jahren existiert der benötigte Formalismus im Rahmen der Quantenfeldtheorie, um den DVCS-Anteil auf der Grundlage von so genannten Generalisierten Parton-Verteilungen (GPDs) beschreiben zu können. Für Kerne mit Spin 0 (z. B. Neon) wird nur eine GPD benötigt, für Spin $\frac{1}{2}$ (z. B. Proton) gibt es 4 GPDs, für Kerne mit Spin 1 (z. B. Deuterium) sind es bereits 9. Die Kenntnis der GPDs ermöglicht unter anderem die Bestimmung des Bahndrehimpulsanteils der Quarks innerhalb des Atomkerns. Mit Hilfe der GPDs ist es auch möglich, die Oberflächenspannung oder einen Druck im Inneren des Kerns anzugeben.

HERMES ist im Augenblick das weltweit einzige Experiment, das DVCS an anderen Atomkernen als Wasserstoff untersucht. Dabei wurden als Targetgase bisher Wasserstoff, Deuterium, Helium, Stickstoff, Neon und Krypton verwendet. Die Reaktionsraten sind sehr gering; innerhalb der geometrischen und kinematischen Akzeptanz des HERMES-Detektors wird nur etwa eines von 1000 Streueignissen mit tiefunelastischer Leptonkinematik durch DVCS in Interferenz mit Bremsstrahlung hervorgerufen.

Die Dominanz der Bremsstrahlung hat zur Folge, dass die Reaktionsrate nicht wie bei tiefunelastischen Ereignissen einfach mit der Anzahl der Nukleonen im Kern skaliert. Das wird deutlich, wenn man die Reaktionsrate auf eine gleiche Anzahl von tiefunelastischen Ereignissen normiert und gegen eine geeignete kinematische Variable aufträgt. In Abbildung 24 wurde die Variable $|t|$ verwendet, wobei t das Vierer-Impulsübertragsquadrat

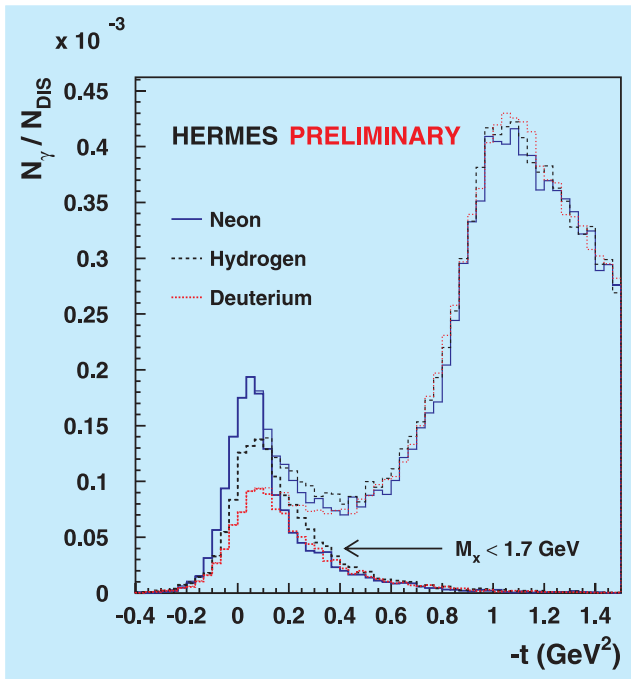


Abbildung 24: Ereignis-Verteilungen in t für H, D und Ne normiert auf die Rate tiefinelastischer Ereignisse.

zwischen ruhendem und gestreutem Kern angibt. Die Ergebnisse für Wasserstoff, Deuterium und Neon sind separat eingezeichnet. Nachdem im exklusiven Prozess für Wasserstoff nur ein Proton nicht nachgewiesen wird, muss die fehlende invariante Masse M_x , die man aus der Lepton- und Photonkinematik erhält, etwa der Protonmasse entsprechen. Deshalb ist es sinnvoll, z. B. $M_x < 1.7 \text{ GeV}$ zu fordern. Dasselbe gilt für den quasielastischen Prozess in anderen Kernen; der ununterscheidbare elastische Prozess an Kernen wird durch diesen Schnitt ebenfalls selektiert, obwohl dafür eigentlich in der Berechnung die Kernmasse eingesetzt werden müsste. Man sieht den Effekt des Schnittes auf den Untergrund (rechts im Bild) und den exklusiven Prozess, der im Bereich kleiner $|t|$ als Erhöhung der Rate N_γ sichtbar ist.

Für Deuterium ist N_γ/N_{DIS} relativ zum Wasserstoff abgesenkt, weil zwar die Raten tiefinelastischer Ereignisse am Neutron und am Proton in der gleichen Größenordnung liegen, aber nur das Proton signifikant zur Bremsstrahlung beiträgt. Für Neon ist das Verhältnis von Neutronen zu Protonen wie beim Deuterium 1 : 1, womit auch N_{DIS} etwa gleich groß ist. Hier dominiert

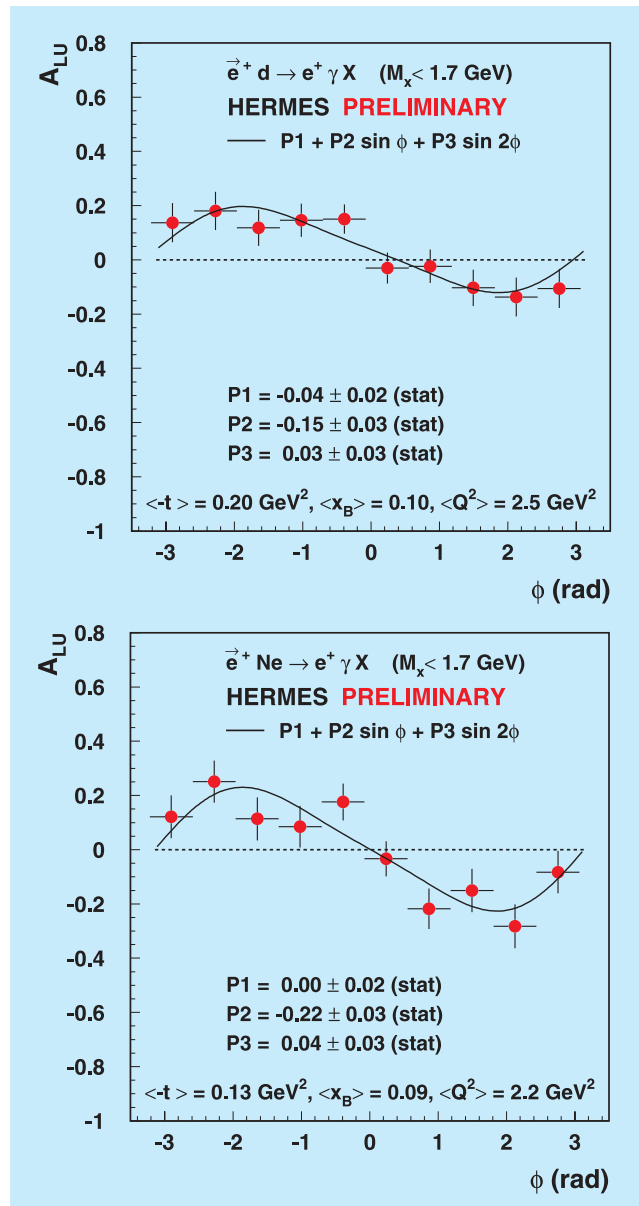


Abbildung 25: Strahlhelizitätsasymmetrie A_{LU} mit longitudinal polarisiertem Strahl und unpolarisiertem Targetgas für Deuterium (oben) und Neon (unten), aufgetragen gegen den Winkel ϕ .

aber bei kleinen Werten von $|t|$ der elastische kohärente Prozess, der für Kerne mit Ladungszahl Z und elektrischem Formfaktor G_E etwa wie

$$N_\gamma \sim Z^2 G_E^2(t)$$

skaliert.

Für die genannten drei Targetgase wurde eine Asymmetrie bezüglich des Winkels ϕ zwischen Leptonstreuungsebene und Photonproduktionsebene gefunden, die ihr Vorzeichen wechselt, wenn die longitudinale Strahlpolarisation P das Vorzeichen wechselt. Die Asymmetrie A_{LU} wird dann aus den Raten N^+ und N^- für Ereignisse mit exklusiver Kinematik und positiver bzw. negativer Strahlhelizität berechnet, wobei das Targetgas unpolarisiert ist:

$$A_{LU}(\phi) = \frac{1}{\langle |P| \rangle} \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}.$$

Die Asymmetrie A_{LU} für Deuterium und Neon ist in Abbildung 25 gegen den Winkel ϕ aufgetragen. Die theoretischen Vorhersagen für diese Asymmetrie sind relativ unempfindlich auf das konkrete GPD-Modell. In führender Ordnung wird ein Sinus-Verhalten vorhergesagt, was experimentell gut bestätigt wird. Da beim Neon der kohärente, elastische Prozess dominiert, der inkohärente Beitrag aber etwa die Asymmetrie des Deuteriums hat, wurde somit erstmals kohärente Tiefvirtuelle Compton-Streuung an einem größeren Atomkern beobachtet.

Die Suche nach Pentaquarks

Nach dreißig Jahren intensiver Suche haben Wissenschaftler an verschiedenen Experimenten Hinweise für eine neue exotische Form von Materie gefunden – ein aus fünf Quarks bestehendes Teilchen, das sie dementsprechend „Pentaquark“ genannt haben. Die Teilchen, die bis dahin bekannt waren, bestehen entweder aus Mesonen, welche ein Quark und ein Anti-Quark enthalten, oder aus Baryonen, welche aus drei Quarks (oder Anti-Quarks) aufgebaut sind. Entsprechend der anerkannten Theorie der Teilchenphysik, dem so genannten Standardmodell, wäre die Existenz eines Quintetts aus Quarks nicht verboten. In den letzten sechs Monaten haben Physiker in Japan, Russland, den Vereinigten Staaten und Europa Hinweise für die Existenz eines Teilchens, das aus zwei up-Quarks, zwei down-Quarks und einem strange-Anti-Quark besteht, gefunden.

Der erste experimentelle Hinweis kam aus dem Forschungszentrum SPring-8 in Japan, wo die LEPS Kollaboration ein Teilchen beobachtet hatte, das eine Masse von 1540 ± 10 (syst) MeV hatte. Eine experimentelle Bestätigung dieses neuen Teilchens erfolgte dann ziemlich rasch von mehreren Gruppen, von denen jede

eine schmale Resonanz im nK^+ oder im pK_S^0 invarianten Massenspektrum bei ungefähr 1540 MeV gefunden hatte. Bemerkenswert dabei war, dass all diese Resultate, nämlich die Masse und die enge Breite der Massenverteilung – weniger als 25 MeV – in guter Übereinstimmung mit theoretischen Vorhersagen einer Gruppe von Physikern am St. Petersburger Institut für Kernphysik waren.

Einer der neuesten Hinweise für die Existenz des Pentaquarks kommt vom HERMES-Experiment, wo hochenergetische Positronen an einem Deuteriumtarget gestreut werden. Die Reaktionsprodukte wurden im HERMES-Spektrometer nachgewiesen und dann analysiert. Bei der Analyse konzentrierte man sich speziell auf Kombinationen von neutralen Kaonen, K^0 -Mesonen, die ein strange-Quark und ein down-Quark enthalten, und Protonen. Dabei wurde das Spektrum der Abbildung 26 gefunden, das auch eine Anhäufung bei einer Masse von 1528 ± 2.6 (stat) ± 2.1 (syst) MeV zeigt.

Im Vergleich zu den anderen Experimenten hatte die HERMES-Kollaboration ihre Messungen bei bedeutend höheren Einfallsenergien durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass bestimmte Komplikationen, die vom Produktionsmechanismus des Pentaquarks hervorrühren könnten, stark reduziert sind. Außerdem sind die gemessenen Spektren zum ersten Mal mit detaillierten Monte Carlo-Simulationen verglichen worden. Aus diesem Grund konnte die HERMES-Kollaboration mit großer Wahrscheinlichkeit nachweisen, dass der beobachtete Massenpeak nicht von einer Kombination von kinematischen Bedingungen, die normalerweise bei der Suche nach neuen Teilchen angewandt werden, verursacht worden ist. Im Weiteren konnten die Monte Carlo-Simulationen verifiziert werden, indem man künstliche Kombinationen von Kaonen und Protonen, die zu verschiedenen Ereignissen gehörten, untersuchte.

Die statistische Signifikanz des Pentaquark Signals wurde auch untersucht. Das HERMES Resultat hat eine Signifikanz zwischen 3 und 4 Standardabweichungen. Dies ist von der gleichen Größenordnung wie die Resultate, die von den anderen Experimenten berichtet worden sind. Wenn man die Masse, die von der HERMES-Kollaboration beobachtet wurde, mit den Massen, die von den anderen Experimenten berichtet wurden, vergleicht und zusammenfasst, findet man ein gewichtetes Mittel von 1536 ± 2.6 MeV.

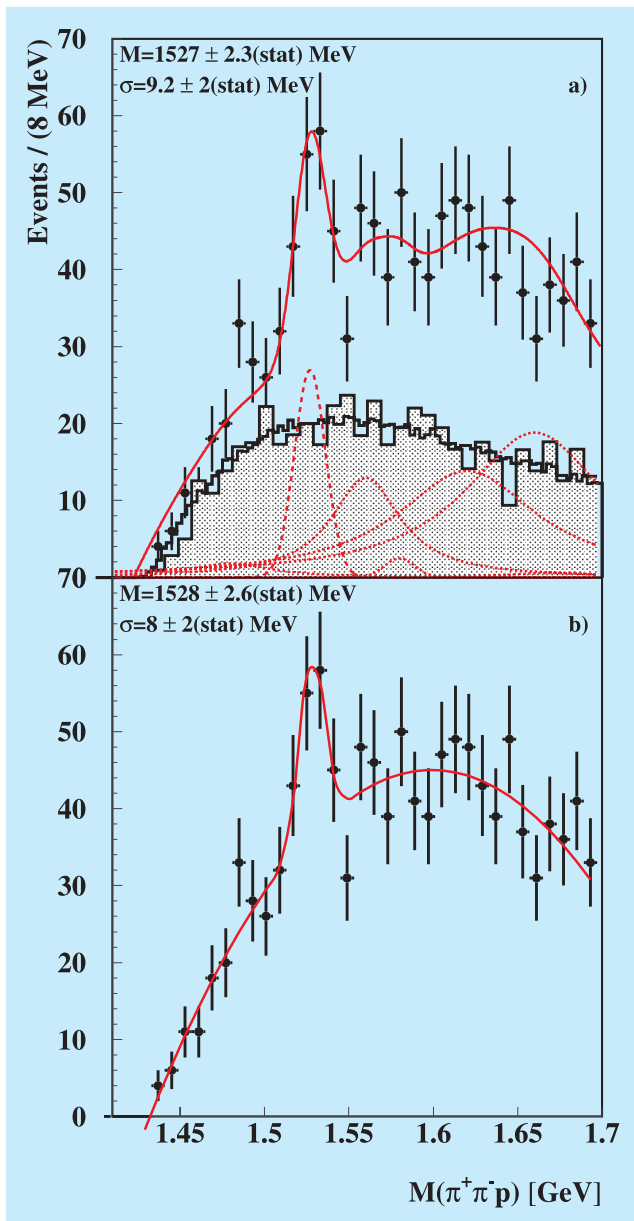


Abbildung 26: Spektrum für die Kaon-Proton Kombinationen, wie sie im HERMES-Experiment gefunden wurden. Der obere Teil zeigt das Resultat einer anspruchsvollen Analyse, in der der Untergrund als eine Kombination aus Monte Carlo-Simulation und mehreren Σ^* Resonanzen behandelt wird. Der untere Teil repräsentiert das Resultat einer konventionellen Analysetechnik, die bisher in den Analysen von allen anderen Experimenten angewandt worden ist.

Aufgrund der guten Energieauflösung des HERMES-Spektromters war es möglich, auch einen Wert für die natürliche Breite Γ des Teilchens zu extrahieren, nämlich $\Gamma = 17 \pm 9 \text{ (stat)} \pm 3 \text{ (syst)} \text{ MeV}$.

Um Information über den Isospin des neuen Teilchens zu erhalten hat die HERMES Kollaboration nach einem ähnlichen Signal in einem Spektrum, das aus positiven Kaonen und Protonen besteht, gesucht. Da kein Signal gefunden wurde schloss man daraus, dass ein doppelt geladenes Pentaquark (Θ^{++}) Teilchen bei etwa 1535 MeV nicht existiert. Daraus folgt, dass das Pentaquark nicht isotensoriell und sehr wahrscheinlich auch nicht isovektoriell ist und deshalb mit großer Wahrscheinlichkeit isoscalar.

Seit dem ersten Hinweis auf die Existenz des Pentaquarks sind zahlreiche theoretische Publikationen erschienen, die die Eigenschaften dieses neuen exotischen Teilchens beschreiben wollen. Einige dieser Modelle können inzwischen ausgeschlossen werden. Es ist aber weiterhin noch nicht ganz klar, ob das beobachtete Pentaquark ein eng gebundener fünf-Quark Zustand, oder eher eine Art von Quark-Molekül ist, das aus einem Kaon und einem Nukleon besteht.

Um diese Frage und die allgemeinen Eigenschaften des Pentaquarks im Detail zu bestimmen, müssen speziell ausgerichtete Experimente durchgeführt werden, die über eine viel höhere Statistik verfügen. Außerdem muss man nach anderen exotischen fünf-Quark Teilchen suchen, die ebenfalls in vielen theoretischen Modellen auftauchen. Die HERMES-Kollaboration strebt beide Ziele an, indem sie zum einen die Triggereffizienz für den Nachweis von Kaon- und Proton-Kombinationen erhöht hat, und zum anderen die Akzeptanz für den Nachweis der Zerfallsteilchen von „Pentaquarks“ erheblich erhöht, wenn die „ Λ -Wheels“ voll funktionstüchtig sind.

Neue Detektorkomponenten

Die Lambda-Wheels

Die Lambda-Wheels bestehen aus zwei radförmigen Anordnungen aus Silizium-Streifendetektoren, die innerhalb des Vakuums des HERA Elektronenstrahls

etwa 50 cm hinter dem internen Target von HERMES montiert sind.

Die Lambda-Wheels vergrößern die Akzeptanz zur Erfassung langsamer Hadronenzerfälle aus verschiedenen semi-inklusiven Reaktionskanälen um einen Faktor zwei bis vier. Außerdem wird die Präzision zur Bestimmung der Polarisation des Λ^0 Hyperons wesentlich erhöht, mögliche große systematische (falsche) Asymmetrien entfallen beim Einsatz der Lambda-Wheels.

Der Detektor besteht aus 12 Modulen und hat einen Außendurchmesser von etwa 33 cm. Jedes Modul hat zwei doppelseitige trapezförmige Zähler aus 6" Silizium Waferscheiben mit dazugehöriger Ausleseelektronik, basierend auf dem HELIX-2.2 Chip. Die Kühlung erfolgt durch einen geschlossenen Ethanol-Kreislauf, der seinerseits durch Peltier-Elemente gekühlt wird.

Im Jahr 2003 wurde der bereits vorher in der HERA Vakuumkammer installierte Detektor in Betrieb genommen. Eine vorläufige Positionskalibrierung mit Spurdaten ist gemacht worden. Abbildung 27 zeigt den Detektor nach seiner Installation.

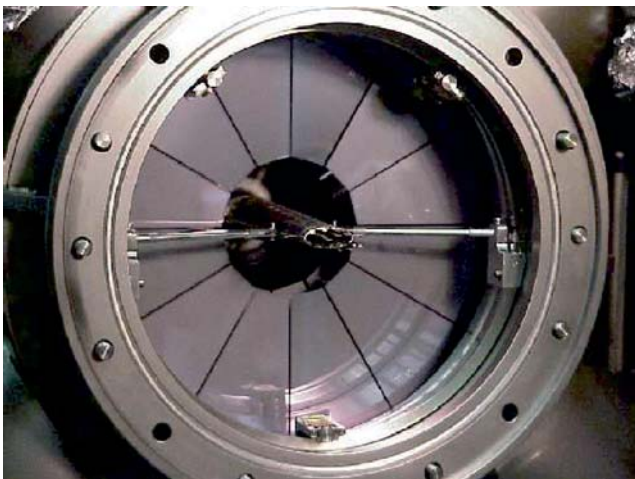


Abbildung 27: Die Lambda-Wheels bei HERMES. Das System besteht aus 12 trapezförmigen Silizium-Modulen, die jeweils zwei Zähler mit einer Dicke von 300 μm mit doppelseitiger Auslese haben. Das mechanische Gerüst und die Ausleseelektronik befinden sich an der äußeren Peripherie und befinden sich außerhalb der Akzeptanz des HERMES-Spektrometers. Das Photo zeigt den Detektor kurz nach seiner Installation.

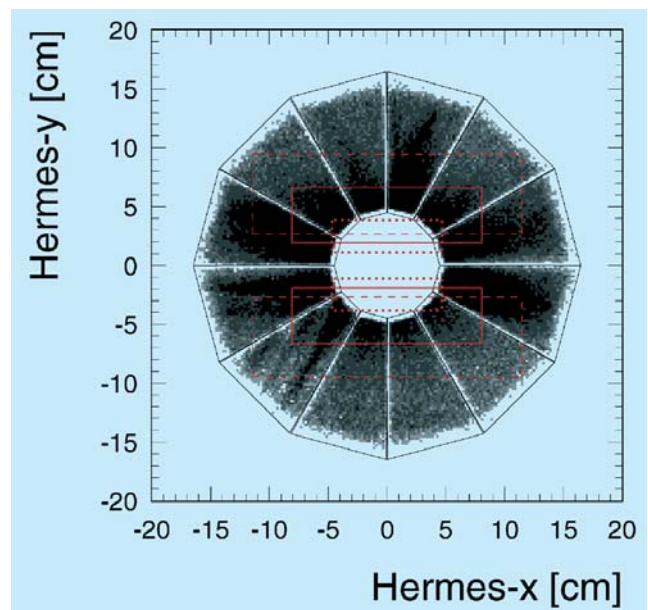


Abbildung 28: Position der Ereignistreffer, gemessen im Lambda-Wheel Detektor im Jahr 2003. Die Signalschwelle für diese Darstellung beträgt 30% des Signals eines minimal ionisierenden Teilchens (d. h. 0.3 MIP). Die Rechtecke markieren die Akzeptanz des HERMES-Spektrometers, gesehen jeweils vom vorderen Ende (punktiert), vom Zentrum (durchgezogen), und vom hinteren Ende (gestrichelt) des Speicherzellen-Targets.

Die von den Lambda-Wheels aufgezeichnete Ereignisverteilung (Abb. 28) entspricht der geometrischen Akzeptanz des HERMES-Spektrometers, wenn eine Koinzidenz mit Spuren in diesem Spektrometer gefordert wird. In diesem Fall wird eine Pulshöhenverteilung beobachtet, die der theoretisch erwarteten Verteilung für minimal ionisierende Teilchen gut folgt (Abb. 29). Seit November 2003 sind die von den Lambda-Wheels aufgezeichneten Daten in die allgemeine HERMES Datenerfassung aufgenommen.

Detektor aus szintillierenden Fasern für den HERMES Rückstoß-Detektor

Zur Vermessung von exklusiven Reaktionen plant die HERMES-Kollaboration den Einbau eines neuen Detektors. Dieser umgibt das Target und soll Reaktionsprodukte moderaten Impulses unter großen Win-

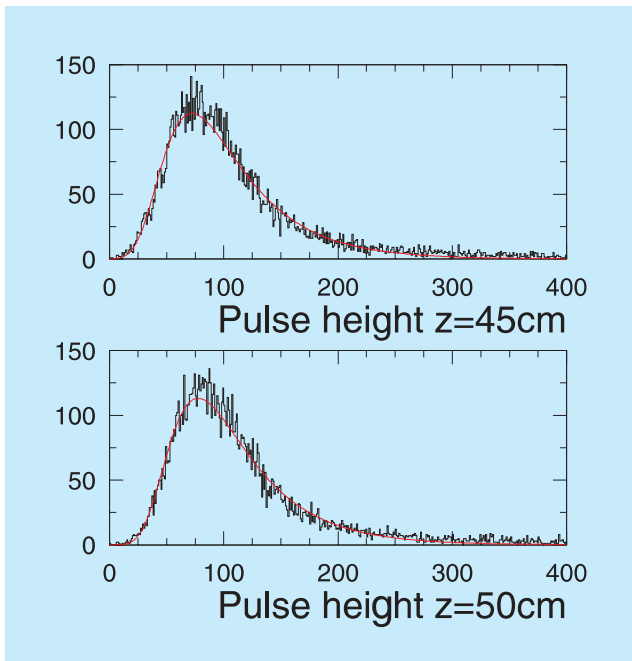


Abbildung 29: *Pulshöhenverteilung (in ADC Einheiten) für in den Lambda-Wheels in Koinzidenz mit dem HERMES-Spektrometer gemessene Ereignisse. Die spektrale Verteilung wird mit der für minimal ionisierende Teilchen erwarteten Landau Verteilung verglichen.*

keln vermessen. Diese Reaktionsprodukte liegen außerhalb des Nachweisbereichs des existierende HERMES-Spektrometers, ihr Nachweis ist allerdings für die Identifikation mit wenig Untergrund dieser Klasse von Reaktionen unabdingbar.

Der Nachweis minimal ionisierender Teilchen erfolgt durch einen Detektor aus szintillierenden Fasern. Dieser besteht aus zwei Zylindern, deren Innenradien 110 mm bzw. 180 mm betragen, und die eine aktive Länge von 280 mm besitzen. Jeder Zylinder ist aus vier Lagen von 1 mm dicken szintillierenden Fasern aufgebaut. Zwei dieser Lagen sind parallel zur Zylinderachse ausgerichtet, die anderen beiden bilden eine Schraubenlinie auf der Zylinderoberfläche mit einem Steigungswinkel von 10° . Trifft ein geladenes Teilchen auf eine dieser Fasern, erzeugt es dort Licht, welches in einem geeigneten Sekundärelektronenvervielfacher nachgewiesen werden kann. Aus der Kombination der vier Lagen eines Zylinders lässt sich dann der geometrische Durchstoßpunkt durch die Zylinderoberfläche bestimm-

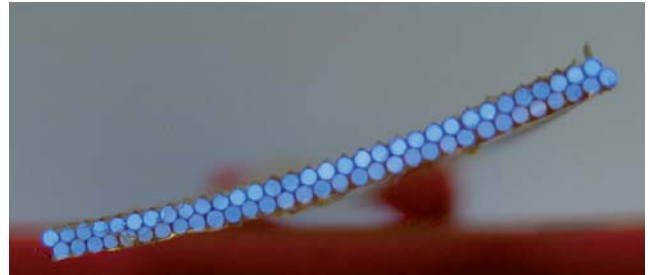


Abbildung 30: *Rückansicht eines Moduls aus szintillierenden Fasern.*

men. Die Kombination beider Zylinder ergibt dann die Spur des Teilchens im Raum. Diese Spurinformaton ermöglicht die Berechnung des Teilchenimpulses.

Neben der Spurrekonstruktion ist die Identifizierung geladener Teilchen die zweite Hauptaufgabe dieses Detektors. Hierfür wird die pro getroffener Faser erzeugte Lichtmenge als Maß verwendet. Für einen festen Impuls – im Falle dieses Detektors aus der Teilchenspur bekannt – hängt die erzeugte Lichtmenge in dem hier relevanten Energiebereich von der Art des Teilchens ab. Unter Verwendung aller verfügbaren Informationen lassen sich somit z. B. Protonen von Pionen trennen.

Der Bau dieses Detektors wird von der HERMES Gruppe an der Justus Liebig Universität Gießen durch-

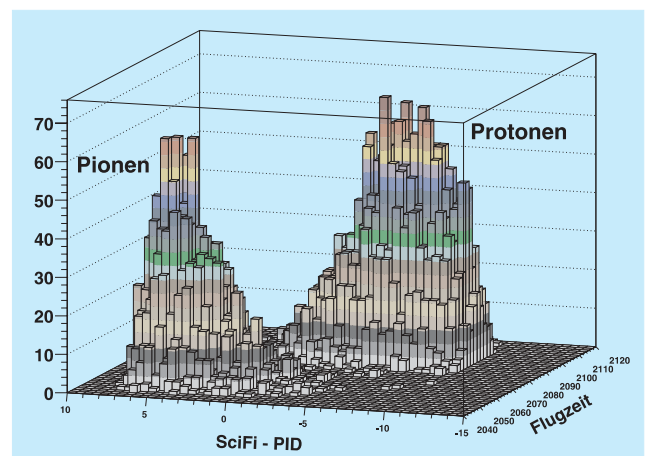


Abbildung 31: *Vergleich der Identifikation von Protonen und Pionen aus der Energiedeposition in den szintillierenden Fasern und aus der Flugzeit.*

geführt. Die Eigenschaften des Detektors werden in mehreren Strahlzeiten sowohl am DESY II als auch bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt getestet. Letztere konnte die für den eigentlichen Zweck des Detektors relevanten Teilchenstrahlen und -energien zur Verfügung stellen. In diesen Teststrahlzeiten wurden sowohl das Verhalten der einzelnen Komponenten, wie der szintillierenden Fasern oder der Ausleseelektronik, als auch das Verhalten des gesamten Systems aus szintillierenden Fasern, Lichtleitern und Auslese getestet.

Als relevante Kenndaten wurden unter anderem die Effizienz des Detektors und seine Fähigkeit zur Separation

von Protonen und Pionen extrahiert. Die Nachweiseffizienz der Module aus szintillierenden Fasern für Protonen und Pionen im Impulsbereich von 300 MeV/c und höher ist für alle getesteten Module größer als 99%. Die Identifizierung von Protonen und Pionen anhand ihrer Energiedeposition in den szintillierenden Fasern wurde im Vergleich mit einem Referenzsystem zur Flugzeitanalyse bestimmt. Der Vergleich beider Systeme ist ein Maß für die Güte der Teilchenidentifikation (Abb. 31).

Der Detektor aus szintillierenden Fasern wird im ersten Quartal 2004 fertig gestellt und am DESY II mit einem Elektronenstrahl vermessen werden. Damit ist der Detektor bereit für den Einbau in HERMES.

HERA-B Experiment

Beteiligte Institute: NIKHEF Amsterdam, Univ. Barcelona, Humboldt Univ. Berlin, Univ. und INFN Bologna, Univ. Cincinnati, LIP and Univ. Coimbra, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, DESY Hamburg, MPI Kernphys. und Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, LIP und Univ. Lissabon, Jozef Stefan Inst. und Univ. Ljubljana, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

Sprecher: M. Medinnis, DESY

HERA-B ist ein Präzisionsspektrometer, das die Wechselwirkungen der Protonen im Halo des HERA-Protonenstrahls mit Drahttargets verschiedener Kernladungszahl untersucht. Die große Akzeptanz des Spektrometers, die hohe Granularität der Teilchenidentifikationssysteme, der hochpräzise Vertexdetektor und ein mehrstufiger Trigger erlauben das detaillierte Studium komplexer und seltener Vielteilchen-Endzustände. Zwischen Sommer 2002 und März 2003 wurden 150 Millionen Ereignisse mit einem Zwei-Leptonen-Trigger und 200 Millionen Ereignisse mit einem „Minimum-Bias“ Trigger aufgezeichnet. Damit ist die Datennahme mit dem HERA-B Spektrometer abgeschlossen. Seither konzentriert sich die Kollaboration auf die Auswertung der Daten. Die Analyse eines kleinen, während der Inbetriebnahme im Jahr 2000 aufgezeichneten Datensatzes, wurde Anfang des Jahres 2003 abgeschlossen und führte zur Veröffentlichung von Messungen des Produktionswirkungsquerschnittes von B- und χ_c -Mesonen sowie von Λ - und K_s^0 -Teilchen.

Während des HERA-Betriebs von Sommer 2002 bis Anfang März 2003 konnte HERA-B 150 Millionen Ereignisse mit dem Zwei-Leptonen-Trigger aufzeichnen. Hierbei handelt es sich um einen mehrstufigen Trigger, der die Selektion seltener Wechselwirkungen mit zwei Leptonen aus einem sehr hohen Untergrund an anderen Zerfallsprodukten der Proton-Kern-Wechselwirkungen ermöglicht. Diese Leptonpaare können zum Beispiel

dem Zerfall von J/ψ -Mesonen entstammen. Durch die Verwendung von Targetdrähten verschiedener Materialien (Kohlenstoff, Aluminium, Titan und Wolfram) ist HERA-B in der Lage, die Abhängigkeit verschiedener Eigenschaften der Proton-Kern-Wechselwirkungen als Funktion der Kernladungszahl zu messen.

Der Datensatz beinhaltet etwa 300 000 Ereignisse mit einem J/ψ im Endzustand, jeweils etwa zur Hälfte Zwei-Myon- bzw. Zwei-Elektron-Zerfälle. Damit konnte der im Jahr 2000 aufgezeichnete Datensatz um mehr als einen Faktor 50 vergrößert werden. Aufgrund einer Vielzahl von Verbesserungen am Detektor- und Triggersystem konnten die Daten in einer vergleichbaren Strahlzeit aufgezeichnet werden. Zusätzlich wurden durch Verbesserungen des Datennahmesystems Datenraten von mehr als 1000 Ereignissen pro Sekunde (mehr als 1 Terabyte pro Tag) für unelastische Wechselwirkungen (so genannte Minimum-Bias Daten) erzielt und innerhalb einer Kalenderwoche ca. 150 Millionen unelastische Ereignisse aufgezeichnet. Dies entspricht einer Erhöhung des Datensatzes aus dem Jahr 2000 um etwa einen Faktor 100.

Die HERA-B Kollaboration hat im März 2003 entschieden, die Datennahme zu beenden und sich ganz auf die Analyse der Daten zu konzentrieren. Daraufhin wurden von Untergruppen der Kollaboration zwei verschiedene Vorschläge für weitere Messungen mit dem HERA-B Spektrometer ausgearbeitet. Diese Vorschläge zur Untersuchung von Teilchen mit Charm (HERA-c) sowie zur Suche nach exotischen Mesonen (HERA-g) wurden

dem Physics Research Committee (PRC) zur Begutachtung vorgelegt. Nach eingehender Diskussion wurden diese Vorschläge vom DESY Direktorium abgelehnt.

Ereignisse mit Zweispurtrigger

Abbildung 32 (oben) zeigt das invariante Massenspektrum von $\mu^+\mu^-$ -Paaren für 80% aller Ereignisse. Ein J/ψ -Signal mit etwa 150 000 Ereignissen ist deutlich sichtbar. Ferner sind Signale von $\psi(2s)$, $\phi(1020)$, $\omega(782)$ und $\rho(770)$ zu erkennen. Auch im Elektronkanal können die gleichen Signale nachgewiesen werden (Abb. 32 (unten)). In diesem Fall wird allerdings die Massenaufösung durch die Bremsstrahlung der Elek-

tronen verschlechtert. Das $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ -Signal entspricht etwa 100 000 Ereignissen.

Zur Zeit werden mehrere Analysen dieser Daten durchgeführt, unter anderem eine Präzisionsmessung des $b\bar{b}$ -Produktionswirkungsquerschnitts, die Suche nach seltenen Zerfällen von D^0 -Mesonen über „flavor changing neutral currents“ (FCNC), eine genauere Messung des χ_c zu J/ψ Produktionsverhältnisses und Analysen der Abhängigkeit des J/ψ -Produktionswirkungsquerschnitts von kinematischen Größen und der Kernladungszahl des Targetmaterials.

FCNC-Zerfälle von D^0 -Mesonen

Innerhalb des Standardmodells sind Prozesse mit neutralen Strömen bei gleichzeitiger Änderung der Quark-Flavor (FCNC) stark unterdrückt. Dies führt zu einer starken Unterdrückung des Zwei-Myon-Zerfallskanals des D^0 -Mesons mit einem erwarteten Verzweungsverhältnis der Größenordnung 10^{-13} . Von einigen Erweiterungen des Standardmodells werden jedoch wesentlich höhere Zwei-Myon-Zerfallsraten vorhergesagt. Nach einer aktuellen Studie wird für ein Minimal Supersymmetrisches Standardmodell (MSSM) mit R-paritätsverletzenden Prozessen ein Verzweungsverhältnis von 3.5×10^{-6} vorhergesagt. Das HERA-B Experiment kann im Zerfall $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ diese Empfindlichkeit erreichen.

Die große Anzahl an Ereignissen in der Massenregion des D^0 -Mesons (1.86 GeV, Abb. 32) zeigt die potentielle Sensitivität von HERA-B für den $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ Zerfallskanal.

Unter Ausnutzung der kinematischen Eigenschaften dieser Zerfälle (hier wird unter anderem ausgenutzt, dass D^0 -Mesonen aufgrund ihrer langen Lebensdauer nicht direkt am Hauptvertex zerfallen), kann die Anzahl der im D^0 -Massenbereich beobachteten Ereignisse auf drei reduziert werden. Der nach der Selektion erwartete Untergrund, der von Prozessen des Standardmodells stammt, wurde auf sechs Ereignisse abgeschätzt, was mit den Beobachtungen verträglich ist. Damit ist es möglich eine vorläufige obere Grenze für das Verzweungsverhältnis von $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ von 2.2×10^{-6} anzugeben. Diese Grenze liegt unterhalb des von dem oben

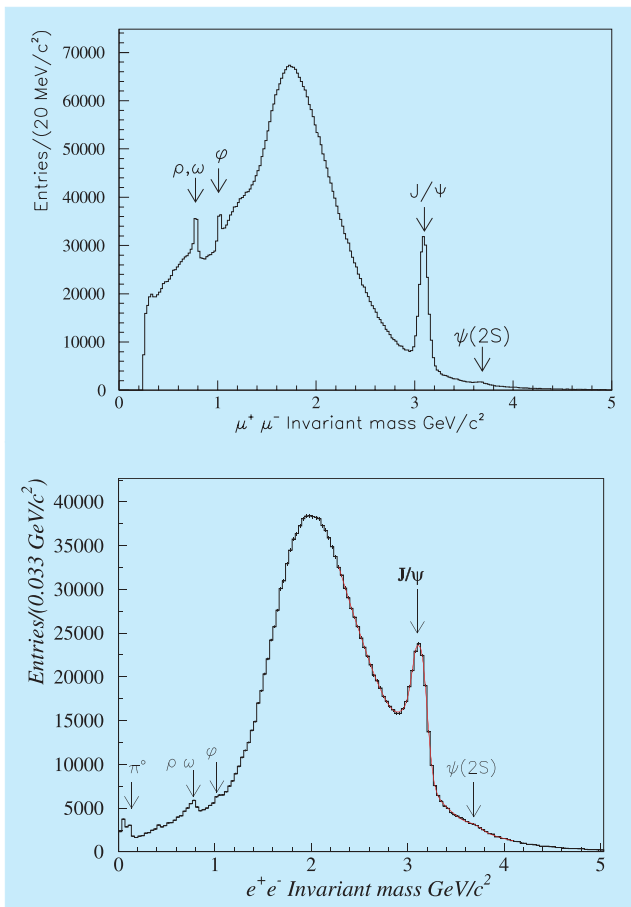


Abbildung 32: Invariantes Massenspektrum der $\mu^+\mu^-$ -Paare (oben) und der e^+e^- -Paare (unten).

erwähnten Minimal Supersymmetrischen Standardmodell (MSSM) vorhergesagten Verzweigungsverhältnis und verbessert die bisher empfindlichste Messung der CDF-Kollaboration von 2.5×10^{-6} .

$b\bar{b}$ -Produktionswirkungsquerschnitt

Die Erzeugung schwerer Quarks in Proton-Kern-Reaktionen erlaubt es, die Quantenchromodynamik (QCD), die Theorie der starken Wechselwirkung, zu testen bzw. ihre phänomenologischen Parameter genauer zu bestimmen. Aus diesem Grund wird von HERA-B eine Präzisionsmessung des B-Wirkungsquerschnittes durchgeführt.

Die Mehrheit der J/ψ -Mesonen wird direkt am Wechselwirkungspunkt erzeugt. Im Gegensatz dazu entstehen J/ψ -Mesonen aus Zerfällen von B-Mesonen aufgrund der langen B-Lebensdauer bei HERA-B Energien typischerweise 1 cm vom Primärvertex entfernt. Allerdings ist nur in etwa einem aus 100 B-Meson Zerfällen ein J/ψ -Meson im Endzustand enthalten.

Das Prinzip der HERA-B-Messung des B-Wirkungsquerschnitts beruht auf der Bestimmung der Rate an J/ψ -Zerfällen, die in Strahlrichtung separiert vom Primärvertex entstehen (und damit wahrscheinlich B-Zerfallsprodukte darstellen) im Vergleich zur Rate an direkt produzierten J/ψ -Mesonen. Da der Wirkungsquerschnitt für direkte J/ψ -Produktion bereits bekannt ist (Messungen von E771 und E789), wird der B-Wirkungsquerschnitt relativ dazu bestimmt. Mit den Daten aus dem Jahr 2000 wurde mit dieser Methode ein B-Produktionswirkungsquerschnitt von $32^{+14}_{-12} \text{ }^{+6}_{-7} \text{ nb/Nukleon}$ gemessen. Die deutlich größere Anzahl von Ereignissen wird eine signifikant genauere Messung ermöglichen. Die Analyse der Daten wird im Moment durchgeführt. Abbildung 33 zeigt für etwa 35% der gesamten Statistik das invariante Massenspektrum für e^+e^- -Paare (oben) und $\mu^+\mu^-$ -Paare (unten) nach Anwendung von Vertexschnitten, um den Beitrag direkt produzierter J/ψ -Mesonen zu unterdrücken. Die Messpunkte mit Fehlerbalken beziehen sich auf Ereignisse, deren Zerfallsvertex stromabwärts vom Wechselwirkungspunkt (Primärvertex) liegt. Das schraffierte Histogramm hingegen enthält Leptonpaare, deren Zerfallsvertex aufgrund der begrenzten Messauflösung des

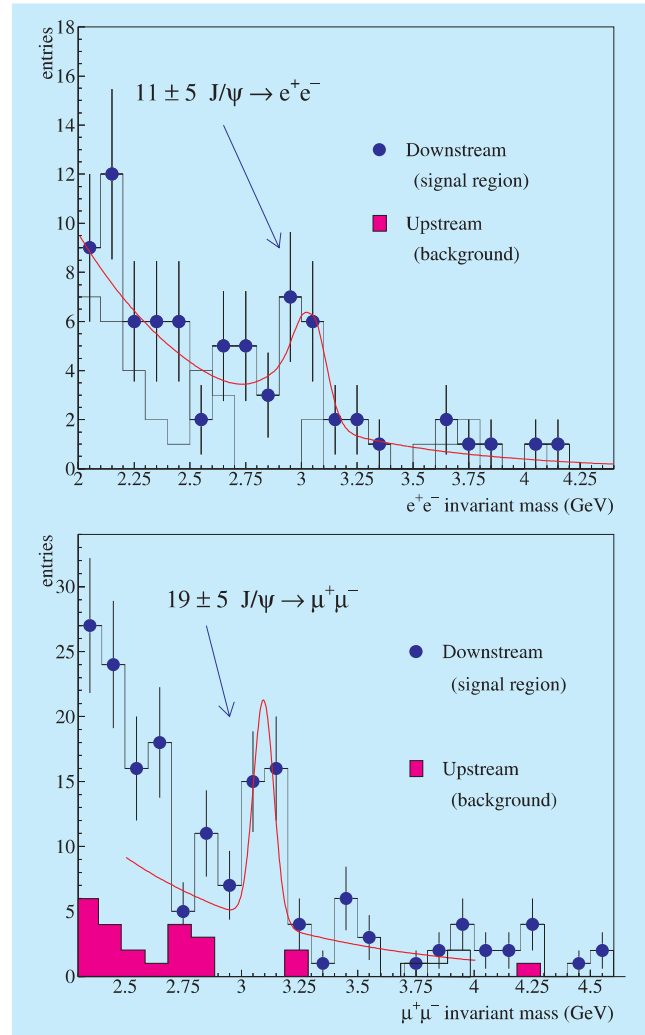


Abbildung 33: Invariantes Massenspektrum der e^+e^- -Paare (oben) und $\mu^+\mu^-$ -Paare (unten) nach Anwendung von Vertexschnitten. Punkte mit Fehlerbalken: der Zerfallsvertex liegt in Strahlrichtung relativ zum Primärvertex. Histogramm: der Zerfallsvertex liegt vom Primärvertex aus gesehen entgegen der Strahlrichtung.

Vertexdetektors entgegen der Strahlrichtung (stromaufwärts) rekonstruiert wurde und die damit ein Maß für den Untergrund darstellen. Die Ereignisse in Strahlrichtung zeigen ein klares J/ψ -Signal, während der Vergleichsdatensatz kein Signal zeigt. Für die volle Statistik werden etwa 100 J/ψ -Ereignisse aus B-Zerfällen erwartet. Zur Zeit werden die Schnittparameter optimiert und systematische Studien durchgeführt.

Charmonium-Erzeugung

Paarproduzierte Charm- und Anticharm-Quarks bilden meistens zusammen mit einem Up- oder Down-Quark D-Mesonen. In einigen Fällen bilden das Charm und Anticharm-Quark gemeinsam einen Charmoniumzustand, ein J/ψ -, χ_c - oder $\psi(2s)$ -Zustand. Die Produktionsmechanismen sind bisher noch nicht genau verstanden, so dass eine Messung der relativen Produktionsrate von χ_c zu J/ψ dazu beitragen kann, zwischen verschiedenen Modellen zu unterscheiden. Basierend auf der Statistik des Jahres 2000 hat HERA-B das Verhältnis zu $0.32 \pm 0.06 \pm 0.04$ gemessen; diese Messung beruht auf 380 ± 74 rekonstruierten χ_c -Mesonen, welche unter Aussendung eines Photons in ein J/ψ zerfallen. Insgesamt können in dem neuen Datensatz etwa 10000 χ_c -Mesonen rekonstruiert werden, wodurch eine deutlich genauere Messung möglich wird. In Abbildung 34 ist die Massendifferenz $\Delta m = m(\ell^+ \ell^- \gamma) - m(\ell^+ \ell^-)$ für eine Untermenge des neuen Datensatzes dargestellt.

Gruppen am Fermilab und CERN haben ausgezeichnete Ergebnisse über die Abhängigkeit der J/ψ -Produktion vom verwendeten Targetmaterial publiziert. Jedoch wird von diesen Messungen der kinematische Bereich der Rückwärtsstreuung (negatives x_F) nicht abgedeckt. Dieser Bereich ist unter theoretischen Gesichtspunkten interessant, da hier das J/ψ -Meson noch im Kern gebildet wird, d. h. bevor das $c\bar{c}$ -Paar den Kern verlassen hat. Die Akzeptanz des HERA-B Experimentes in diesem Bereich erlaubt eine weitergehende Überprüfung der existierenden Modelle. Zusätzliche Details hierzu können dem Beitrag der HERA-B/Zeuthen-Gruppe entnommen werden.

Minimum-Bias-Datensatz

Das HERA-B-Experiment benutzt den großen Datensatz von unelastischen Ereignissen, um Aspekte der offenen Charmproduktion und der Produktion von Teilchen mit Strangeness zu untersuchen. Des Weiteren kann mit diesem Datensatz nach Anzeichen des kontrovers diskutierten Pentaquark-Zustandes θ^+ mit einer Masse von $1.54 \text{ GeV}/c^2$ gesucht werden, der auch von den zwei HERA-Experimenten HERMES und ZEUS beobachtet wurde.

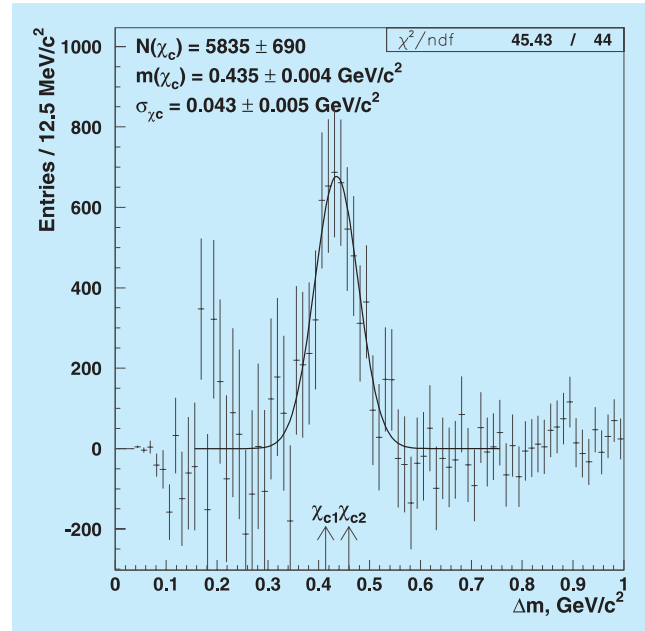


Abbildung 34: Spektrum der Massendifferenz $\Delta m = m(\ell^+ \ell^- \gamma) - m(\ell^+ \ell^-)$ nach Abzug des kombinatorischen Untergrunds.

Suche nach Pentaquarkzuständen

θ^+ ist ein Kandidat für den vorhergesagten 5-Quark-Zustand (Pentaquark), der sich aus zwei Up- und Down-Quarks sowie einem Antistrange-Quark zusammensetzt. θ^+ wurde bisher in den Zerfallskanälen pK_s^0 und nK^+ beobachtet; für HERA-B ist der Zerfallskanal $\theta^+ \rightarrow pK_s^0$ zugänglich.

Die Analyse des gesamten Minimum-Bias-Datensatzes hat keine Anzeichen für ein Signal im pK_s^0 -Kanal ergeben, obwohl HERA-B aufgrund der großen Statistik eine hohe Sensitivität aufweist (Abb. 35). Die Beobachtung von deutlichen Kontrollsignalen wie das $\Lambda(1520)$ beweisen, dass die Analysen sensitiv auf ein mögliches Pentaquark-Signal sind, wenn der Produktionswirkungsquerschnitt groß genug ist. Eine obere Grenze für den Produktionswirkungsquerschnitt kann somit abgeleitet werden und wird helfen die Kontroverse um θ^+ aufzulösen bzw. als Anhaltspunkt dienen, um Produktionsmodelle zu entwickeln.

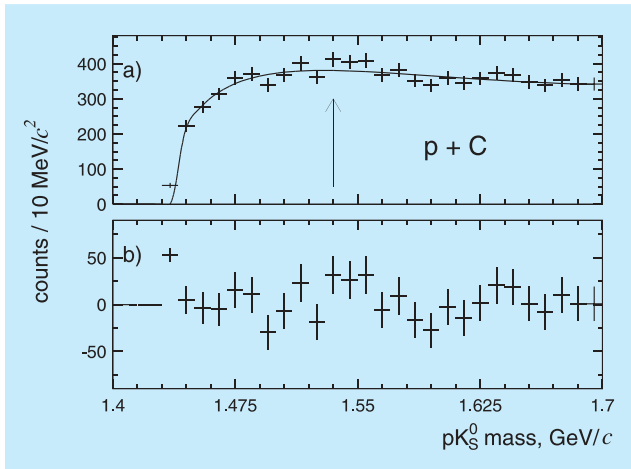


Abbildung 35: pK_s^0 Massenverteilung aus $p + C$ Ereignissen. a) Die durchgezogene Linie stellt den durch die „event mixing“ Methode bestimmten Untergrund dar. b) Nach Abzug des Untergrunds verbleibende Ereignisse. Der Pfeil markiert die Masse des θ^+ .

Erzeugung von Teilchen mit Charm

Wie die B-Produktion ist die Untersuchung der Charm-Produktion ein empfindlicher Test der perturbativen QCD-Rechnungen. Messungen von $\sigma(c\bar{c})$ in Proton-Kern-Wechselwirkungen existieren bei HERA-B nahen Energien. Allerdings haben diese Messungen noch große Unsicherheiten, so dass genauere Daten wichtig sind. Da der Charm-Wirkungsquerschnitt mehr als einen Faktor 1000 größer ist als der B-Wirkungsquerschnitt bei der HERA-B Energie, können Teilchen mit Charm im Minimum-Bias-Datensatz nachgewiesen werden, ohne sie durch einen besonderen Trigger anzureichern.

Abbildung 36 zeigt das invariante Massenspektrum für die Zerfälle $D^0(\bar{D}^0) \rightarrow K^\mp \pi^\pm$ (oben) und $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ (unten) für den gesamten unelastischen Datensatz. Da D-Mesonen vor ihrem Zerfall einige Millimeter zurücklegen, werden Vertexschnitte benutzt, um die Beiträge von Spurkombinationen aus dem Primärvertex zu unterdrücken. Sowohl für neutrale als auch für geladene D-Mesonen sind signifi-

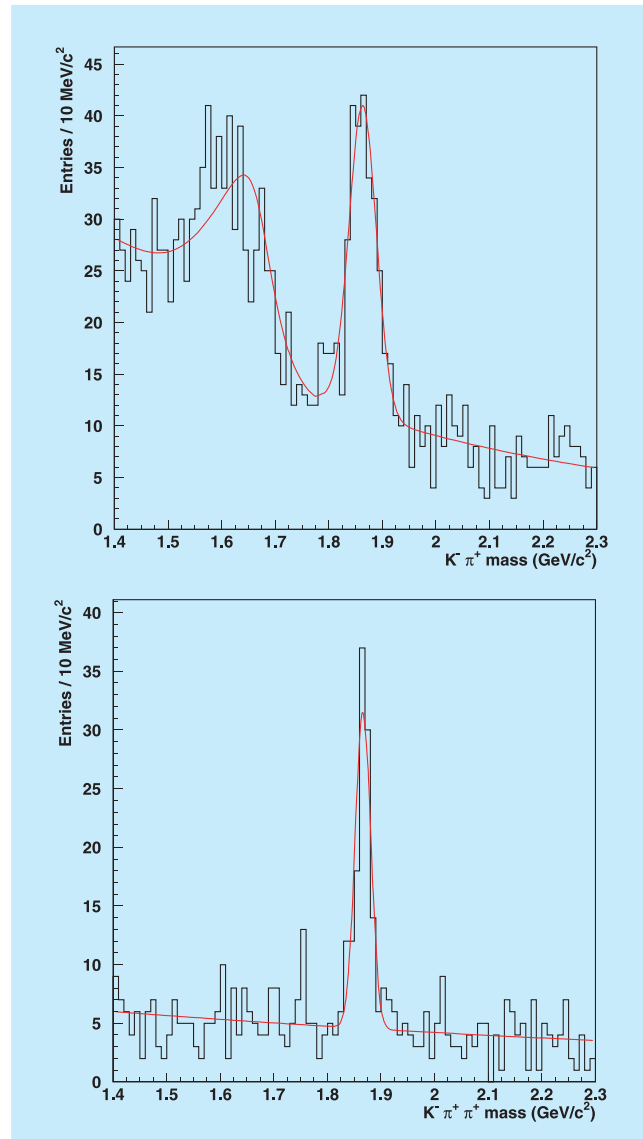


Abbildung 36: Invariantes Massenspektrum von $K^\mp \pi^\pm$ - (oben) und $K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Kombinationen (unten). In der oberen Abbildung ist unterhalb des $D^0(\bar{D}^0)$ -Signals eine Schulter aus unvollständig rekonstruierten Zerfällen zu sehen.

kante Signale zu erkennen. Mit diesen Signalen wird HERA-B den Charm-Produktionswirkungsquerschnitt mit höherer statistischer Signifikanz messen als bisherige Experimente. Systematische Fehler und Normalisierungsfaktoren werden zurzeit untersucht.

Strangeness-Produktion

Teilchen mit der Quantenzahl Strangeness werden in großer Anzahl in Proton-Kern-Wechselwirkungen produziert; die Mehrzahl der Reaktionen enthalten ein $s\bar{s}$ -Paar. Die relativ kleine Masse des Strange-Quarks macht verlässliche Vorhersagen der Produktionswirkungsquerschnitte schwierig. Es besteht jedoch ein starkes Interesse an den Produktionsparametern, speziell als Funktion der Kernladungszahl des Targetmaterials, aufgrund der Relevanz für Studien zu Schwerionenwechselwirkungen bei RHIC und der Suche nach dem schwer nachweisbaren Quark-Gluon-Plasma.

Signal	Statistik
K_s^0	4 900 000
$K^*(892)$	950 000
$\phi(1020)$	50 000
Λ^0	1 100 000
$\bar{\Lambda}^0$	520 000
$\Sigma^+(1385)$	380 000
Ξ^+/Ξ^-	20 000
$\Xi(1530)^0$	2 800
Ω^+/Ω^-	1 300

Tabelle 1: Anzahl der rekonstruierten Zerfälle von Resonanzen mit Strangeness.

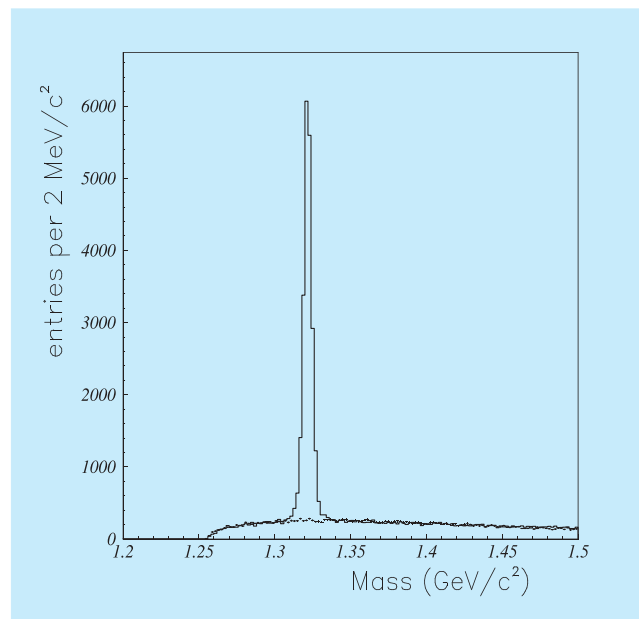


Abbildung 37: Invariantes Massenspektrum von $\Lambda(\bar{\Lambda})\pi^\pm$ Kombinationen.

Wie man Tab. 1 entnehmen kann, erlaubt der umfangreiche Minimum-Bias-Datensatz von HERA-B den Nachweis von Mesonen und Baryonen mit Strangeness. Als Beispiel für die hohe Qualität der Daten ist in Abbildung 37 das invariante Massenspektrum von $\Lambda\pi^+$ und $\bar{\Lambda}\pi^-$ Kombinationen dargestellt, in dem ein deutliches Signal des Zerfalls $\Xi^\pm \rightarrow \Lambda(\bar{\Lambda})\pi^\pm$ zu erkennen ist.

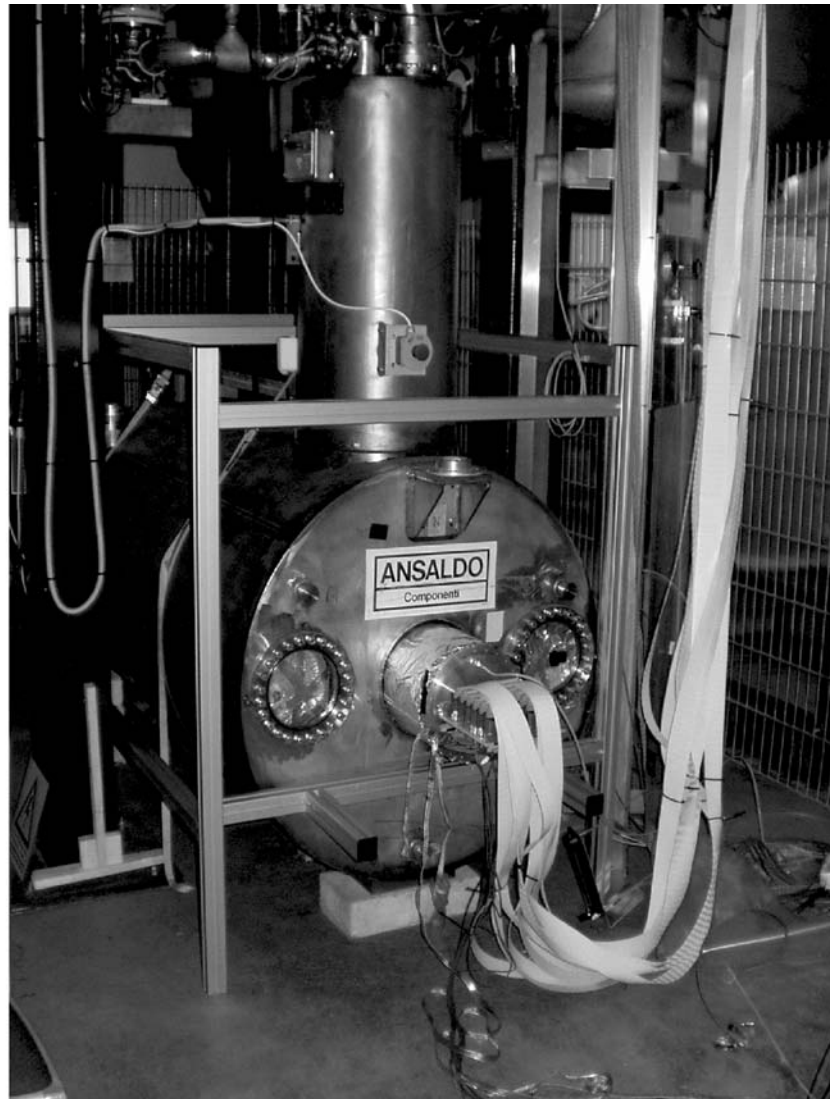


Abbildung 38: Photographie des Hochfeld-Magneteststandes am DESY mit der Test TPC teilweise in den Magneten eingeschoben. Der Magnet kann ein solenoides Feld mit einer Stärke bis zu 5.2 T erzeugen. Er wird intensiv von DESY Gruppen und von externen Gruppen genutzt, um Tests an Detektorkomponenten in hohen magnetischen Feldern durchzuführen.

Forschung an Lepton Collidern

Beteiligte Gruppen: Mitglieder und Gäste der Gruppe FLC, sowie im Rahmen der ECFA Studie etwa 66 Institute aus 17 Ländern.

Sprecher: T. Behnke, DESY und R.-D. Heuer, Univ. Hamburg

Die internationale Gemeinschaft der Teilchenphysiker hat im Jahre 2003 in großer Einigkeit einen Elektron-Positron Linearbeschleuniger mit einer Energie zwischen 500 GeV und etwa 1 TeV als das nächste große Projekt identifiziert. Dieses wurde in allen drei Regionen der Welt, Amerika, Asien, und Europa, einmütig beschlossen. Das physikalische Programm einer solchen Maschine und die wesentlichen Parameter wurden in internationalen Dokumenten festgelegt. Diese Entwicklung wird in zunehmendem Maße auch von politischen Gremien anerkannt – als Beispiel sei das „Global Science Forum“ der OECD genannt.

In seiner Grundsatzentscheidung zur Forschung mit Großgeräten in Deutschland vom Februar 2003 erkannte Deutschland diese Entwicklungen an. DESY bekam den Auftrag, eine deutsche Beteiligung an einem solchen Projekt vorzubereiten, ohne dass jetzt schon eine Entscheidung über den Ort des Beschleunigers getroffen worden ist. Gleichzeitig wurde der X-FEL, der bisher ein Teil des TESLA Projekts war, als separates Projekt in Form eines europäischen Labors für einen Röntgenlaser genehmigt.

Noch stärker als vorher wurde nach der Entscheidung das Augenmerk darauf gerichtet, die Studien zur Vorbereitung eines Linearbeschleunigers international einzubinden, und eng mit den anderen Regionen abzustimmen.

Im Jahre 2003 endete plangemäß die ECFA/DESY Studie mit einem Treffen in Amsterdam. ECFA autorisierte eine neue Studie, die „ECFA Linear Collider Study“, die mit einem Treffen in Montpellier im Herbst des Jahres die Arbeit aufnahm.

Der Linearbeschleuniger TESLA

Im Jahr 2003 nahmen in der Gruppe FLC die Aktivitäten im Bereich der Detektorentwicklungen für ein Experiment an einem Linearbeschleuniger deutlich zu, bei gleichzeitiger Fortführung intensiver Studien zur Physik an einer solchen Maschine.

Die Gruppe FLC ist schwerpunktmäßig an zwei Detektorprojekten beteiligt: der Entwicklung einer TPC für den Linearbeschleuniger, und der Entwicklung eines hadronischen Kalorimeters. Beide Aktivitäten haben die Phase der explorierenden Arbeiten, die die vorhergehenden Jahre kennzeichneten, verlassen, und konzentrieren sich auf die Konstruktion einer ersten Generation von Prototypen. Die Arbeiten umfassten die Entwicklung und den Bau aussagekräftiger erster Prototypen, die in den folgenden Jahren mit kosmischen Strahlen und an Teststrahlen untersucht werden sollen. Eine wichtige Rolle spielen auch Software-Entwicklungen, die in beiden Bereichen stattfinden.

Physikstudien werden nach wie vor mit großer Intensität betrieben. Obwohl der TESLA TDR (Technical Design Report) die wesentlichen physikalischen Begründungen für den Linearbeschleuniger liefert, sind die dort dokumentierten Studien in vieler Hinsicht nicht komplett oder abgeschlossen. Die Weiterentwicklung von Rekonstruktionsalgorithmen und vor allem die realistischere Modellierung der Detektoren erfordern eine ständige Aktualisierung der Analysen. Theoretische Entwicklungen ermöglichen darüber hinaus neue Analysen oder verbesserte Interpretationen existierender Analysen.

Das Interesse an einem Linearbeschleuniger wie TESLA hat auch in diesem Jahr weiter zugenommen. Die beiden Arbeitstreffen in Amsterdam und in Montpellier waren sehr gut besucht und zeigten das große Interesse der Hochenergiephysiker an diesem Projekt. Die Unterstützung für den Linearbeschleuniger zeigen sich auch an der großen Zahl an Unterschriften, die inzwischen für das „consensus document“ gesammelt wurden (<http://www-flc.desy.de/lcsurvey>). Mehr als 2500 Physikerinnen und Physiker haben im letzten Jahr dieses Dokument durch ihre Unterschrift unterstützt.

Physikstudien für den Linear Collider

Physikstudien für den Linear Collider (LC) konzentrieren sich auf folgende Themen:

- LHC/LC-Arbeitsgruppe,
- Verbindung von LC-Physik zur Kosmologie und Astrophysik,
- Präzisionsanalysen von supersymmetrischen Modellen,
- Einfluss von Detektor- und Maschinenparametern auf die Präzision von Observablen,
- Verbesserung der Rekonstruktions- und Analysesoftware.

Auch in der seit 2003 laufenden ECFA-Studie spielt die Gruppe FLC weiterhin eine führende Rolle. Die Zielsetzungen der obengenannten Themenbereiche sowie aktuelle Beiträge der Gruppe werden im Folgenden erläutert.

LHC/LC-Arbeitsgruppe

Ziel der internationalen LHC/LC-Arbeitsgruppe ist es, an konkreten Beispielen zu untersuchen, wie sich der LHC und der LC gegenseitig ergänzen. Hierbei arbeiten Experimentalphysiker am LC und am LHC sowie Theoretiker eng zusammen. Ein erster Zwischenbericht der Arbeitsgruppe soll Anfang 2004 erscheinen. Zwei Beiträge aus der Gruppe FLC sollen kurz erwähnt werden.

Wenn das Higgs Boson existiert und relativ leicht ist – wie aus den Präzisionsmessungen elektroschwa-

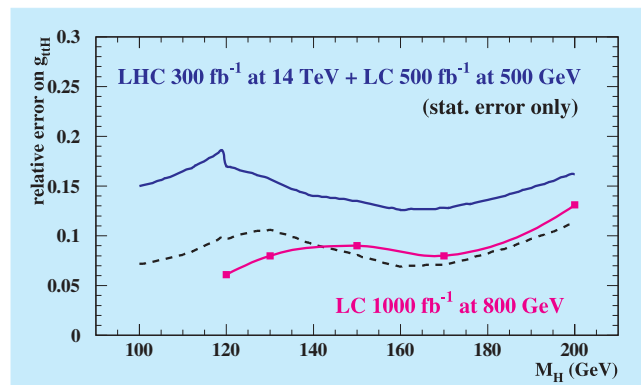


Abbildung 39: Erwarteter Fehler für die Messung der Kopplungsstärke zwischen Higgs Boson und top-Quark aus der Kombination von LHC-Daten und LC-Daten bei 500 GeV Schwerpunktsenergie. Die erreichbare Präzision an einem 800 GeV LC allein ist ebenfalls gezeigt.

cher Observablen geschlossen werden kann – wird es am LHC mit großer Sicherheit entdeckt werden. Genaue und modellunabhängige Messungen sind am LHC jedoch schwierig. Viele Higgs Boson-Kopplungen können am LC schon in der ersten Phase (Schwerpunktsenergie bis 500 GeV) präzise gemessen werden. Für die Higgs-Kopplung an das top-Quark gilt dies jedoch nicht. Hierfür ist eine höhere Energie nötig, wie sie in der zweiten Stufe des LC erreicht werden soll. Am LHC kann ein leichtes Higgs Boson zusammen mit einem top-Quark-Paar erzeugt werden. Die Rate dieses Prozesses ist im Prinzip proportional zum Quadrat der Higgs-Top-Kopplung, jedoch können am LHC die Verzweungsverhältnisse des Higgs Bosons nicht gemessen werden. Eine Kombination der LHC-Ratenmessung mit der Messung der Verzweungsverhältnisse am LC ermöglicht eine Bestimmung der Higgs-Top-Kopplung ohne wesentliche Modellannahmen. Die erreichbare Präzision liegt im Bereich von etwa 10% (Abb. 39).

In supersymmetrischen Modellen ergänzen sich LHC und LC ideal, da der LHC eine größere Sensitivität für Farbladung tragende Superpartner (Squarks und Gluinos) hat, während der LC die präzise Untersuchung der farbneutralen Superpartner (Charginos, Neutralinos, Sleptonen) ermöglicht – immer vorausgesetzt, die Massen der supersymmetrischen Teilchen befinden

sich innerhalb des am LC bzw. am LHC zugänglichen Bereiches. Die Bestimmung der Massen der schweren Superpartner am LHC kann durch die LC-Messungen entscheidend verbessert werden, auch für diejenigen Superpartner, die am LC nicht direkt beobachtbar sind. Darüber hinaus ermöglichen beispielsweise die Messungen der leichteren Charginos und Neutralinos indirekte Vorhersagen der Massen der schwereren SUSY-Teilchen. Solche Vorhersagen verwandeln die LHC-Suchen nach diesen Teilchen in Hypothesentests, was einerseits deren statistische Signifikanz erhöht und es andererseits erlaubt, die LHC-Analysen auf bestimmte Massenregionen zu optimieren.

Verbindung zur Kosmologie und Astrophysik

Neuere Ergebnisse der Astrophysik, insbesondere Präzisionsmessungen der Verteilung und der Fluktuation der kosmischen Hintergrundstrahlung, aber auch die Evidenz für Neutrinooszillationen, haben der Hoffnung neuen Auftrieb gegeben, Modelle zur Entstehung des Universums experimentell untersuchen zu können. Zur Entwicklung und Überprüfung solcher Modelle spielen Experimente an Beschleunigern eine wichtige Rolle. Dies bildet neben der zentralen Frage der Untersuchung der Mikrophysik selbst eine weitere Motivation für den LC. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die Möglichkeit, die im Universum nachgewiesene dunkle Materie am LC detailliert zu untersuchen. Kandidaten für dunkle Materie werden sowohl in supersymmetrischen Modellen wie auch in Modellen mit zusätzlichen Raumdimensionen vorhergesagt. Speziell in der minimalen supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells bildet das leichteste Neutralino einen hervorragenden Kandidaten für dunkle Materie. Neuere LC-Studien konzentrieren sich auf die genauere Untersuchung der von solchen kosmologischen Modellen vorhergesagten Parameterregionen.

Präzisionsanalysen supersymmetrischer Modelle

Die Möglichkeit einer modellunabhängigen Analyse der fundamentalen SUSY-Parameter ist eine der großen Stärken des LC. In einer gemeinsamen Studie von Theoretikern und Experimentalphysikern wird zur Zeit die Rekonstruktion dieser Parameter im Detail untersucht.

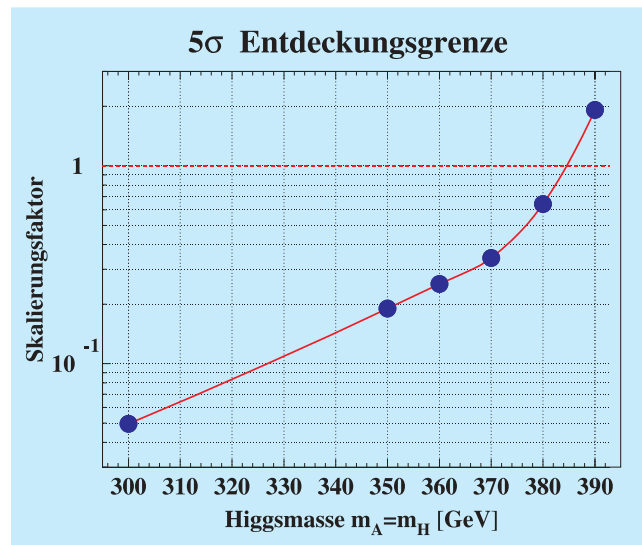


Abbildung 40: Skalierungsfaktor für die Luminosität, um ein Higgs Boson in einem speziellen supersymmetrischen Modell mit mindestens 5σ Signifikanz zu entdecken.

Hierbei sollen Effekte durch Korrekturen höherer Ordnung ebenso untersucht werden wie die Möglichkeit einer globalen Anpassung der Modellparameter an die zukünftigen Messungen (globaler Fit). Ziel ist es, an einem konkreten Modellpunkt die gesamte Kette der Analysen von der experimentellen Messung über eine globale Anpassung bis zur theoretischen Interpretation kohärent durchzuführen. Die Gruppe FLC ist hier zentral beteiligt durch mehrere Simulationen (Neutralinos, Sleptonen) sowie durch die Entwicklung eines globalen Fits, der experimentelle und theoretische Unsicherheiten sowie deren Korrelationen berücksichtigt.

Ein Beispiel einer solchen Analyse ist in Abbildung 40 gezeigt. In einer bestimmten Klasse von Modellen können die beiden schwersten Higgs Bosonen A und H massenentartet sein. Für diesen Fall zeigt die Abbildung die relative Luminosität (Skalierungsfaktor), die an einem Linearbeschleuniger notwendig ist, um die Teilchen zu entdecken, für verschiedene Massenhypothesen der Bosonen. Der Skalierungsfaktor 1 entspricht dabei der Luminosität, die am 800 GeV TESLA Beschleuniger in einem Jahr gesammelt werden kann. Higgs Bosonen mit Massen von fast 385 GeV sind somit nachweisbar mit mehr als 5σ Signifikanz, leichtere Bosonen können mit deutlich größerer Genauigkeit vermessen werden.

Einfluss von Detektor- und Maschinenparametern

Das im TDR vorgelegte Detektorkonzept ist für größtmögliche Präzision in der Rekonstruktion einzelner geladener und neutraler Teilchen durch Kombinationen eines präzisen Nachweises geladener Teilchen mit einer feinsegmentierten Kalorimetrie (Particle-Flow Konzept) optimiert worden. Zur Rechtfertigung dieses Konzepts sowie zur Kosten-Nutzen-Optimierung auf dem Weg zu einem konkreten Detektordesign ist es nötig, konkrete Detektorparameter (z. B. Kalorimeter-Zellengröße) direkt zur erreichbaren Präzision zu messender Observablen (wie z. B. Higgs-Kopplungen oder Massenpräzision supersymmetrischer Teilchen) in Bezug zu setzen. Derartige Studien gehen deutlich über die Anforderungen an bisherige Simulationsstudien hinaus. Im Rahmen der ECFA-Studie wurde eine „Detector Performance Group“ gegründet, die diese Fragen genauer untersuchen soll. Die Gruppe FLC trägt zu diesen Studien an mehreren Stellen bei. Einerseits werden neue Rekonstruktions- und Analysewerkzeuge entwickelt, andererseits werden konkrete Studien zu systematischen Fehlern (speziell im Bereich der Higgs-Physik) durchgeführt. Die teils aufwändigen Weiterentwicklungen im Bereich der Software sowie deren Anwendungen zur genaueren Studie des Particle-Flow Konzepts werden auch in Zukunft eine zentrale Rolle innerhalb der Physikstudien spielen.

Software Entwicklungen

In den letzten Jahren ist in der Hochenergiephysik ein Paradigmenwechsel eingetreten. Traditionelle, meist in Fortran realisierte, Prozedur-orientierte Software wird von Objekt-orientierten Systemen abgelöst. Diese versprechen, neben der größeren Leistungsfähigkeit, die mit der Verwendung moderner Programmiersprachen wie C++ oder Java einhergehen, eine deutlich vereinfachte Wartung großer Programmpakete, und eine bessere Wiederverwendbarkeit von Software.

Erste Schritte, um diesen Paradigmenwechsel auch in den Linear Collider Studien durchzuführen, konnten 2003 eingeleitet werden. In enger Zusammenarbeit mit dem Stanford Linear Accelerator Center, USA, und der Ecole Polytechnique, Paris, wurde ein Objekt-

orientiertes Datenmodell für Linear Collider Physik erstellt und zusammen mit einem Persistenzsystem verwirklicht (LCIO). Durch die Verwendung einer abstrakten Programmierumgebung, ANT, konnte sichergestellt werden, dass dieses Datenmodell unabhängig von der verwendeten Sprache ist. Im Moment werden Implementationen in C++, Java (und Fortran) bereitgestellt. LCIO wurde inzwischen von den Physik-Studien in Europa und in den USA als offizielles Datenmodell akzeptiert. Verschiedene Prototypexperimente setzen LCIO als Grundlage für die Datenaufzeichnung in den Experimenten ein. Diese Arbeiten wurden wesentlich von der Gruppe FLC in enger Zusammenarbeit mit der IT Gruppe am DESY durchgeführt.

Die in Fortran existierende Simulationsumgebung BRAHMS wird in zunehmendem Maße von dem in C++ und GEANT4 geschriebenen MOKKA übernommen. Der TESLA Detektor ist inzwischen weitgehend in MOKKA implementiert, und vergleichende Studien zwischen BRAHMS und MOKKA haben begonnen.

Rekonstruktionssoftware, die ebenfalls in BRAHMS enthalten ist, wird über einen längeren Zeitraum hinweg in einen Objekt-orientierten Rahmen überführt werden. Im Rahmen des LCIO Projektes wird eine Umgebung entwickelt, die den modularen Einsatz verschiedener Rekonstruktionsmodule erlauben wird.

Detektorentwicklung

Kalorimetrie

Eines der Herzstücke des TESLA Detektorkonzeptes ist das Kalorimeter. Studien, die in den vergangenen Jahren an vielen Stellen durchgeführt wurden, haben klar ergeben, dass das Konzept des „Particle-Flows“ im Moment zumindest der einzige Ansatz ist, um die notwendige Qualität der Rekonstruktion am Linear Collider zu erreichen. Die Grundidee des Particle-Flows ist sehr einfach: Ziel ist es, jedes Teilchen im Ereignis, ob geladen oder neutral, zu rekonstruieren und seine Energie und seinen Impuls zu messen. Dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn die Kalorimeter systematisch daraufhin optimiert werden, einzelne Teilchen zu rekonstruieren. Dies erfordert Geräte mit enormer Granularität, um die Separation von Teilchen in Jets zu ermöglichen.

Die DESY Gruppe ist an der Entwicklung eines hadronischen Kalorimeters für ein Particle-Flow Kalorimeter beteiligt. Zwei unterschiedliche Konzepte werden diskutiert: ein relativ konventionelles, analoges Gerät, und ein neuartiges digitales Konzept. Digital bedeutet hier, dass die einzige Information eines „Hits“ im Kalorimeter sein Ort ist, nicht aber seine Energie, die an dem Orte deponiert wurde. Bei hinreichend feiner Granularität kann gezeigt werden, dass es reicht, einfach die Treffer zu zählen, um eine gute Auflösung zu erreichen. Allerdings ist die Zahl der notwendigen Zellen extrem hoch. Beim konventionellen analogen Kalorimeter wird neben dem Ort auch die Amplitude des Hits aufgezeichnet. Die damit verfügbare zusätzliche Information erlaubt es, eine geringere Granularität zu haben, stellt allerdings höhere Anforderungen an die Detektoren und die Auslese. In Hamburg wird schwerpunktmäßig an der analogen Option gearbeitet.

Für beide Optionen ist einer der wichtigsten Parameter, die sowohl die technische Realisation als auch die Kosten des Gerätes beeinflussen, die Granularität des Kalorimeters. Intensive Studien sind gemacht worden, um für die analoge Option einer optimierten Zellenstruktur näher zu kommen. Im Moment können solche Studien nur mit Hilfe umfangreicher Simulationen verwirklicht werden.

In Abbildung 41 ist gezeigt, wie sich die Rekonstruktion eines neutralen Teilchens ändert, wenn es dicht neben einem geladenen Teilchen das Kalorimeter trifft. Gezeigt wird die Energie des neutralen Schauers, rekonstruiert mit verschiedenen Zellgranularitäten. Deutlich ist, dass kleine Zellen ($3 \times 3 \text{ cm}^2$) und sehr gute Segmentierung in der Tiefe notwendig sind, um eine gute Trennung zu erzielen.

Basierend auf ersten Erfahrungen mit einem kleinen Kalorimetermodell ist eine optimierte Zellengeometrie erarbeitet worden, die im so genannten Physik-Prototyp verwirklicht werden soll. Die Anordnung der Zellen wurde so gewählt, dass im Kern des Schauers ausreichend hohe Granularität vorhanden ist, zur Seite und zum Ende hin aber größere Zellen dafür sorgen, dass die Zahl der Kanäle mit etwa 8000 überschaubar bleibt.

Große Aktivitäten sind im letzten Jahr auch im Bereich der Photodetektoren entwickelt worden. Eine Entwick-

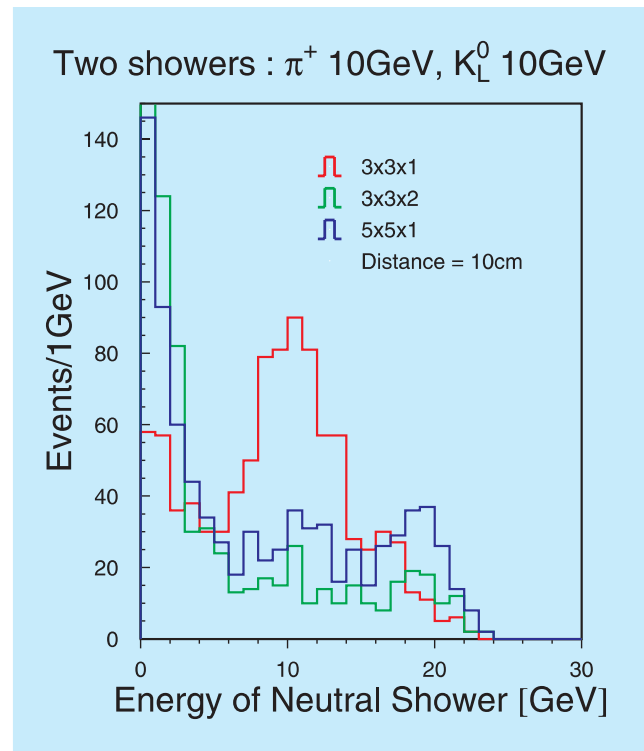


Abbildung 41: Energie, rekonstruiert für ein neutrales Kaon neben einem geladenem Pion, für verschiedene Detektorgranularitäten. Die Energie beider Teilchen ist 10 GeV.

lung verdient besondere Erwähnung: Nach vielen Jahren sind so genannte Si-Photomultiplier (Si-PM) so weit entwickelt worden, dass sie auch eingesetzt werden können. Si-PMs sind Silizium-basierende Detektoren, die im Geiger Mode betrieben werden. Trifft ein Photon auf eines der Pixel, löst es eine Lawine aus, die dann nachgewiesen wird. Die Zahl der Photonen wird durch die Anzahl der angesprochenen Pixel bestimmt. Si-PMs sind sehr kompakt und erlauben dadurch, den Photodetektor direkt auf einen Scintillatorziegel zu montieren. Dies vereinfacht entscheidend die Konstruktion des Kalorimeters. Die Möglichkeit, den Si-PM direkt auf dem Ziegel zu montieren, erlaubt es, jeden Ziegel individuell auszulesen. Erste Erfahrungen wurden im vergangenen Jahr mit einer solchen Si-PM Auslese sowohl im Labor als auch im so genannten Minical, einem kleinen Test-Kalorimeter, gesammelt. In Abbildung 42 ist ein einzelner Ausleseziegel mit einem Si-PM abgebildet.

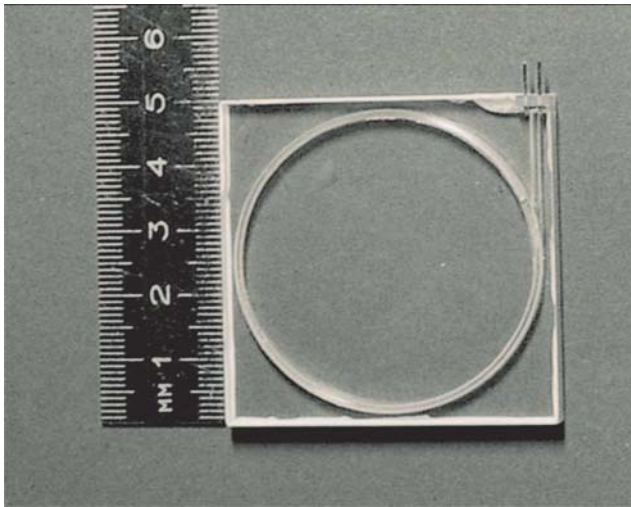


Abbildung 42: Photo eines Szintillatorziegels mit einem Si-PM.

Das Minical ist ein kleines Kalorimeter, das in den letzten Monaten intensiv in einem Elektronenteststrahl am DESY untersucht worden ist. Es wird hauptsächlich dazu verwendet, Betriebserfahrungen mit etwa 100 Kanälen von Photodetektoren zu sammeln, und verschiedene Photodetektoren miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus hat es sich als sehr hilfreich dazu erwiesen, die Detektorsimulation besser zu verstehen und Daten und simulierte Ereignisse besser zur Übereinstimmung zu bringen. In Abbildung 43 ist der Zusammenhang zwischen der Zahl der nachgewiesenen Photonen und der Energie, die im Szintillator deponiert wurde, gezeigt.

Im nächsten Jahr wird sich die Arbeit hauptsächlich auf den Bau und die Inbetriebnahme eines größeren Prototyps konzentrieren, der dann zusammen mit einem Prototyp des elektromagnetischen Kalorimeters in einem Elektronen- und in einem hadronischem Teststrahl vermessen werden soll.

Zeit-Projektions Kammer

Das TESLA Detektor Konzept enthält als einen zentralen Teil der Spurerkennungssysteme eine Zeit-Projektionskammer (TPC). In den Vorjahren sind am DESY erste prinzipielle Untersuchungen darüber gemacht worden, inwieweit eine Zeit-Projektionskammer

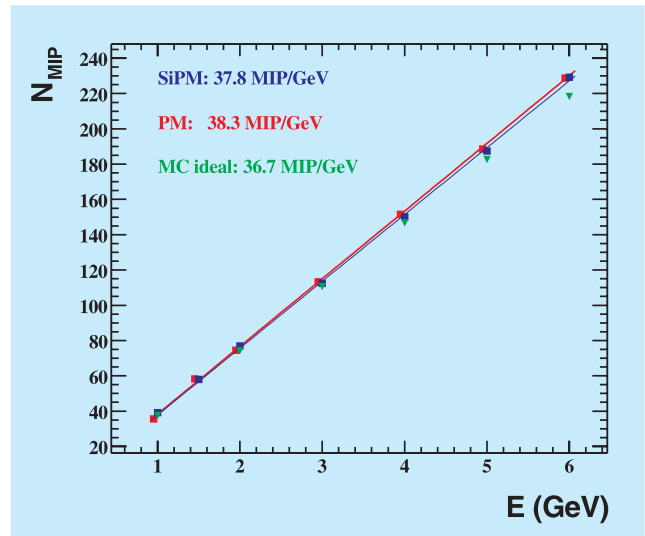


Abbildung 43: Korrelation zwischen der Zahl der Photoelektronen und dem Signal des Si-PM.

mit neuartigen „Micro Pattern Gas Detectors“ (MPGD) ausgelesen werden kann. Dies wurde in enger Zusammenarbeit mit anderen Instituten in Deutschland, Frankreich und Kanada durchgeführt.

Nach dem erfolgreichen Abschluss dieser prinzipiellen Untersuchungen lag der Schwerpunkt dieses Jahr auf dem Bau und der Inbetriebnahme einer TPC, die gezielt für solche MPGD Auslesen entwickelt wurde. Am DESY wurde ein spezieller Feldkäfig entwickelt und gebaut, der zum einen das notwendige Feld erzeugt, zum anderen mechanisch so ausgelegt ist, dass er in der im Jahre 2002 in Betrieb gegangenen Hochfeld-Testanlage betrieben werden kann.

Diese Kammer wurde in der zweiten Hälfte des Jahres fertiggestellt und in Betrieb genommen. Erste Spuren von kosmischen Strahlen konnten aufgezeichnet werden, und zeigen, dass die Kammer im Prinzip funktioniert. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde Software entwickelt, die die Rekonstruktion von Spuren in der Test TPC ermöglicht. Ein Ereignis mit mehreren Spuren ist in Abbildung 44 zu sehen.

Erste Messungen der Auflösung der TPC konnten durchgeführt werden. In Abbildung 45 sind die Auflösungen in z und in x ($r - \phi$) gezeigt.

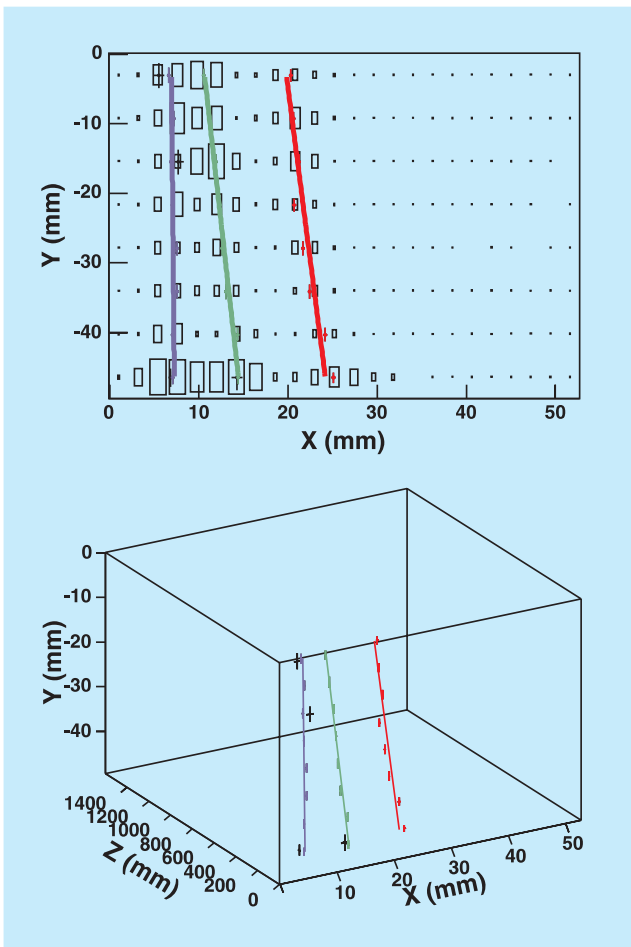


Abbildung 44: Mehrspurereignis, aufgezeichnet in der neuen TPC

Parallel zum Bau der Kammer ist ein neues VME basierendes Datennahmesystem aufgebaut worden. Viele der zentralen Elemente dieses Systems basieren immer noch auf der sehr alten, beim ALEPH Experiment am CERN eingesetzten Elektronik. Allerdings wurden die Auslese und die Kontrolle neu erstellt und in VME realisiert. Dadurch konnte ein wesentlich höherer Datendurchsatz erreicht werden. Dieses System konnte ebenfalls im Herbst des Jahres in Betrieb genommen werden und erlaubt nun die Auslese mehrerer hundert Kanäle.

Im Laufe des Jahres konnten in Zusammenarbeit mit der Aachener Gruppe erste Messungen einer TPC in sehr hohen Magnetfeldern vorgenommen werden. Die Felder – bis zu 5 T – wurden in der neuen Hochfeld-

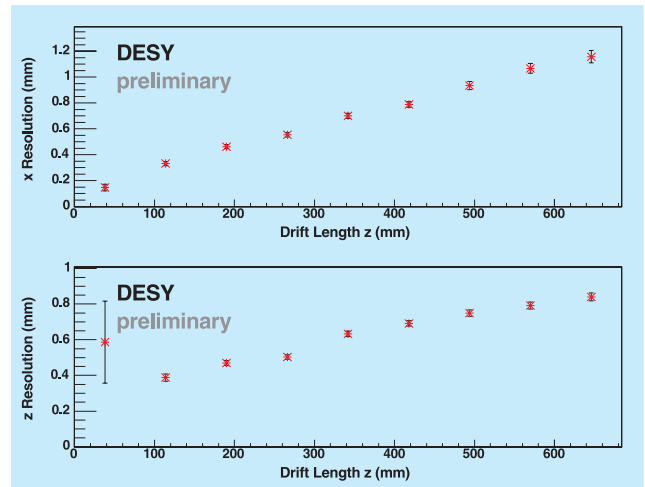


Abbildung 45: Gemessene Auflösungen in z und x der TPC als Funktion der Driftlänge.

Testanlage erzeugt, die basierend auf dem alten ZEUS Kompensatormagneten am DESY aufgebaut worden ist. In den ersten Messungen wurden grundlegende Eigenschaften einer GEM in hohen Feldern gemessen. Verstärkung, Elektronen-Transmission und die Unterdrückung des Ionenrückflusses waren die Hauptparameter. Die Ergebnisse stimmen mit den Erwartungen überein und demonstrieren, dass ein Betrieb der GEM-Strukturen in sehr hohen Feldern möglich ist.

Mitarbeiter der DESY Gruppe haben im Herbst an Teststrahl Experimenten am CERN teilgenommen. Eine kleine Testkammer, die von der Universität Karlsruhe gebaut worden ist, wurde dort in einem Hadron-Strahl untersucht. Neben grundlegenden Studien zur Auflösung sind besonders erste Untersuchungen erwähnenswert, die Effekte großer Raumladungen auf die Genauigkeit der Spurrekonstruktion zeigen. Mit Hilfe der Daten wird es möglich sein, erste realistische Abschätzungen über den Einfluss solcher Raumladungen auf die Genauigkeit der Rekonstruktion zu machen.

In einer Kooperation mit dem Budker Institut, Novosibirsk, wurden GEMs eines russischen Herstellers untersucht. Hierzu besuchte ein Vertreter vom Budker Institut das DESY für mehrere Wochen, nahm am Aufbau eines Testsystems teil und führte Messungen mit und ohne Magnetfeld durch.



Forschung Linearbeschleuniger

Sprecher: P. Schmüser, Univ. Hamburg

Die Gruppe „Forschung Linearbeschleuniger“ (FDET) arbeitet an beschleunigerphysikalischen Untersuchungen, die von hoher Relevanz für den TESLA-Collider und den X-FEL sind. Eine Mitarbeit besteht an der Weiterentwicklung der supraleitenden Resonatoren zu höchsten Feldstärken und an systematischen Untersuchungen zu den kritischen Magnetfeldern von Niob. Die theoretisch vorhergesagten „wake fields“ in rauen Strahlrohren sind weltweit erstmals von der Gruppe experimentell nachgewiesen worden. Ein zentrales Forschungsgebiet ist die Entwicklung höchstauflösender Zeitmessmethoden mit Hilfe der elektrooptischen Abtastung. Erste erfolgreiche Messungen sind am TTF1-Linac und an der Swiss Light Source durchgeführt worden.

Seit September 2003 besteht eine enge Kooperation mit der Gruppe HERA-B mit dem Ziel einer Zusammenlegung beider Gruppen. Die angelaufenen gemeinsamen Aktivitäten werden in diesem Jahresbericht noch nicht vorgestellt.

Supraleitende Resonatoren für höchste Energien in TESLA

Die entscheidende Maßnahme für die vorgesehene Energieerhöhung des TESLA-Colliders von 500 auf 800 GeV ist die Steigerung der Beschleunigungsfelder in den supraleitenden Resonatoren. Um die benötigten Gradienten von 35 MV/m zu erreichen, kommt der Oberflächenpräparation im Innern der Resonatoren eine herausragende Bedeutung zu. Die bisher verwendete chemische Beizung hat ihre Leistungsgrenze bei knapp 30 MV/m, die elektrolytische Politur (EP) der Nioboberfläche geht deutlich weiter. In Zusammenarbeit mit mehreren Instituten (CEA, CERN, KEK, TJNAF) hat ein ehemaliger Doktorand unserer Gruppe

(Lutz Lilje) seit Ende 1998 hervorragende Ergebnisse mit einzelligen Resonatoren (bis 42 MV/m) erzielt. In enger Zusammenarbeit mit dem japanischen Teilchenphysikzentrum KEK und einer japanischen Firma ist das Elektropolitur-Verfahren auf neunzellige Resonatoren übertragen worden. Vier neunzellige TESLA-Resonatoren haben 35 MV/m erreicht, einer dieser Resonatoren wurde in einem Dauertest mehr als 1000 Stunden beim Maximalfeld betrieben. Ein fünfter Resonator wurde in der neuen EP-Anlage bei DESY behandelt und erreichte den Rekordwert von 40 MV/m bei 1.8 K und einem Gütefaktor von 10^{10} . Die Daten werden in Abbildung 46 gezeigt.

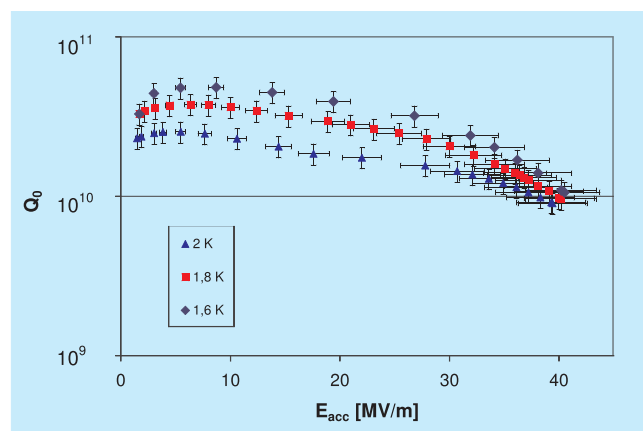


Abbildung 46: Gütefaktor des besten elektropolierten neunzelligen TESLA-Resonators als Funktion des Beschleunigungsfeldes.

Experimentelle Untersuchung von Störwellenfeldern in rauen Strahlrohren

Der Freie-Elektronen-Laser (FEL) erfordert extrem kurze und intensive Ladungspakete, damit die Laser-

Wirkung einsetzen kann und hinreichend Verstärkung vorhanden ist. Wandrauigkeiten im Vakuumrohr innerhalb der Undulatormagnete erzeugen intensive Störfelder („wake fields“), die eine negative Auswirkung auf die Strahlqualität haben können. Dieser theoretisch vorhergesagte Effekt ist von unserer Gruppe erstmals experimentell nachgewiesen worden.

Normalerweise liegt die Phasengeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in Hohlleitern oberhalb der Lichtgeschwindigkeit.

In Wanderwellenbeschleunigern wird durch periodisch angeordnete Blenden im Strahlrohr die Phasengeschwindigkeit bei einer bestimmten Frequenz (3 GHz am SLAC-Linac) auf den Wert c herabgesetzt, so dass eine kontinuierliche Energieübertragung von der laufenden HF-Welle auf die mit gleicher Geschwindigkeit fliegenden Elektronen erfolgen kann. In theoretischen Arbeiten an der TU Darmstadt und am SLAC wurde vorhergesagt, dass die Mikrometer-Wandrauigkeiten in engen Strahlrohren in gewisser Weise auch als Blenden wirken können und bei Frequenzen um 500 GHz die Phasengeschwindigkeit auf c absenken sollten. Die dadurch entstehenden *wake fields* würden nach den Darmstadt-Rechnungen die Strahlqualität ernsthaft beeinträchtigen, während vom SLAC-Modell nur relativ schwache Effekte vorgesagt wurden. Wegen der großen Bedeutung für den TESLA-Collider und Röntgen-FEL wurde von unserer Gruppe ein spezielles Experiment mit künstlich aufgerauten Strahlrohren durchgeführt. Das überraschende Ergebnis war, dass die Wandrauigkeiten trotz ihrer stochastischen Natur eine harmonische Störwelle hervorrufen, deren Stärke mit der Vorhersage des Darmstadt-Modells übereinstimmt. Die gemessenen, periodisch modulierten Energieprofile der Elektronenbunche werden in Abbildung 47 gezeigt. Die Elektronenbunche werden so geformt, dass sie ein scharfes Maximum an der Spitze haben, welches die harmonischen Störfelder anregt, und einen langen Schwanz, in dem die Störfelder eine periodische Dichtemodulation hervorrufen. Durch geeignete Wahl der HF-Phase im 2. Beschleunigungsmodul wird daraus eine periodische Energiemodulation. Dargestellt ist die Zahl der Elektronen im Schwanz des Bunches als Funktion der von den *wake fields* hervorgerufenen Energieverschiebung ΔE . Die durchgezogenen Kurven (a), (b), (c) zeigen die Messungen an aufgerauten Strahlrohren von 3, 4, 5 mm Radius, Kurve (d) die Messung

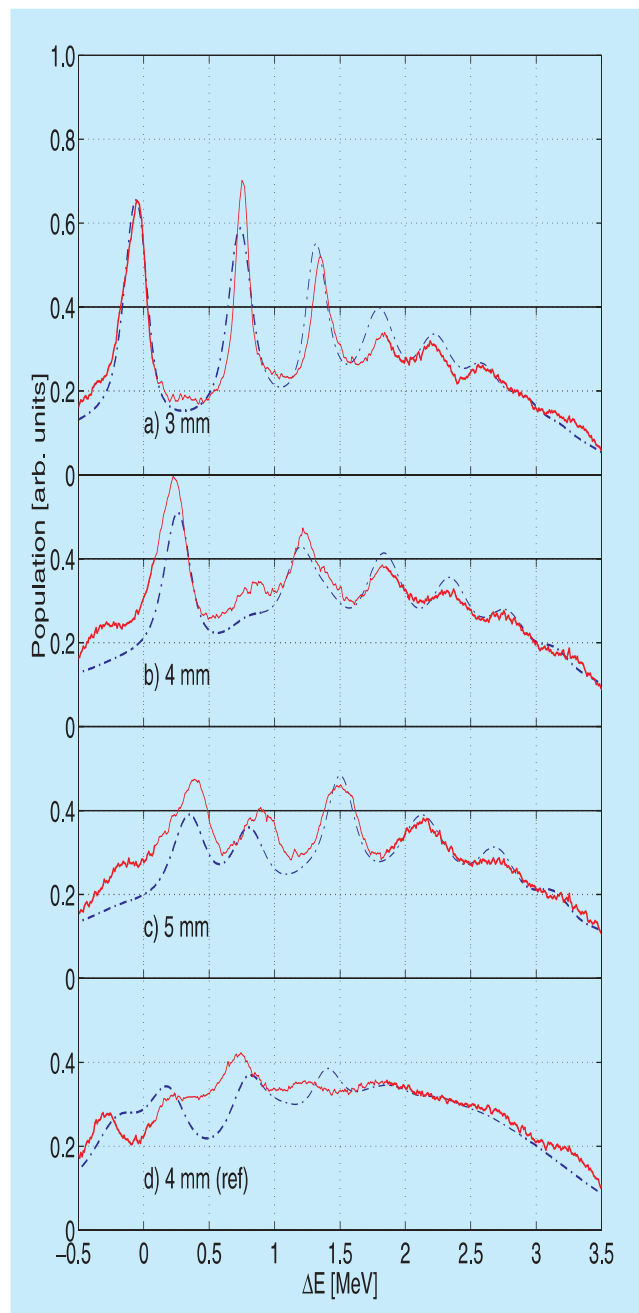


Abbildung 47: Experimenteller Nachweis der periodischen *wake fields* in rauen Strahlrohren. Dargestellt ist die Zahl der Elektronen im Schwanz des Bunches als Funktion der von den *wake fields* hervorgerufenen Energieverschiebung ΔE . Durchgezogene Kurven (a), (b), (c): aufgeraute Strahlrohre von 3, 4, 5 mm Radius; Kurve (d): glattes Referenzrohr von 4 mm Radius. Gestrichelte Kurven: Simulationsrechnungen. Für Details siehe Text.

an einem glatten Referenzrohr von 4 mm Radius. Die gestrichelten Kurven zeigen Simulationsrechnungen. Die bei dem glatten Referenzrohr sichtbaren Strukturen werden durch *wake fields* in strahlaufwärts befindlichen Beschleunigerkomponenten wie z. B. dem Bunch-Kompressor verursacht. Wegen der Komplexität dieser Komponenten ist die theoretische Beschreibung sehr unvollkommen.

Arbeiten zur elektro-optischen Abtastung der Elektronenpakete in Linearbeschleunigern

Ein wesentliches Anliegen der Beschleuniger-Diagnostik ist die Vermessung der longitudinalen Ladungsverteilung in den ultrakurzen Elektronenpaketen („bunches“). Dazu nutzt man die von dem Elektronenbunch mitgeführten Ladungsfelder oder die an Metallfolien emittierte Übergangsstrahlung aus, die elektromagnetischen Impulsen im THz-Bereich mit Pikosekunden-Dauer entsprechen. Die elektro-optische Abtastung (electro-optic sampling EOS) ermöglicht die Messung dieser Felder mit sehr guter Zeitauflösung. Die grundlegende Idee besteht darin, einen nichtlinearen optischen Kristall wie ZnTe zu verwenden, der durch das elektrische Feld doppelbrechend wird und dessen Polarisationsanisotropie durch einen polarisierten Femtosekundenlaserpuls abgetastet wird. Der Abtastpuls muss hochpräzise mit dem Elektronenbunch synchronisiert sein. Die relative zeitliche Lage von THz-Puls und Laserpuls kann durch Variation der Hochfrequenzphase kontinuierlich variiert werden.

Der schematische Aufbau eines Experiments zur elektro-optischen Abtastung von kohärenter Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) wird in Abbildung 48 gezeigt.

Am TTF1-Linac ist 2002 das erste EOS-Experiment bei DESY durchgeführt worden. Um die Koinzidenz zwischen dem 15 fs-Titan-Saphirlaserpuls und dem mehrere Pikosekunden langen CTR-Puls zu finden, wurde die relative Verzögerung der beiden Pulse in Schritten von 0.3 ps durchgeföhren. Abbildung 49 zeigt die Amplitude des Detektorsignals als Funktion der Verzögerung.

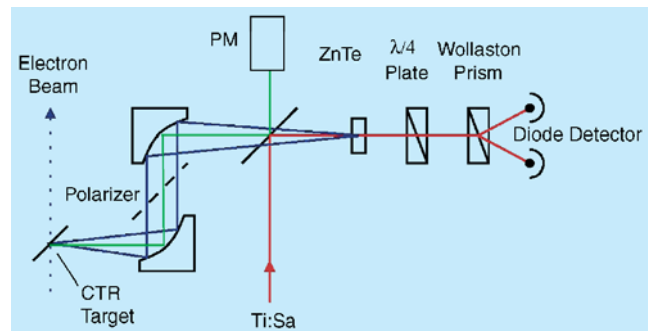


Abbildung 48: Schematische Darstellung der elektro-optischen Abtastung von Übergangsstrahlungs-Pulsen im THz-Bereich. Nach Durchlaufen des ZnTe-Kristalls werden die Titan-Saphir-Laserpulse mit einem balancierten Diodendetektor nachgewiesen. Der grobe Zeitabgleich (0.7 ns Genauigkeit) wird mit einem Photomultiplier PM vorgenommen, der die Laserpulse und die Signale der optischen Übergangsstrahlung registriert.

Es wurde ein klares Koinzidenzsignal beobachtet, aber bei dieser Messung waren die zeitlichen Schwankungen (time jitter) von 700 fs (rms) noch zu groß, um eine genaue Bestimmung der Bunchlänge zu erlauben.

EOS-Experimente stellen extrem hohe Anforderungen an die Qualität der Synchronisation zwischen den Elektronenpaketen und den Laserpulsen. Für die Experimente, die gegenwärtig in Kooperation mit dem Paul-Scherrer-Institut am 100 MeV-Linac der Swiss Light Source durchgeführt werden, wird ein Femtosekundenlaser mit 81 MHz Repetitionsrate benutzt. Die Synchronisation der Lasers mit der 500 MHz Hochfrequenz des PSI-Linacs wird über eine Vergleichsfrequenz von 3.5 GHz bewerkstelligt, die die 7. Harmonische der Linac-HF und die 43. Harmonische der Laserfrequenz ist. Sind beide 3.5 GHz Signale nicht exakt frequenzgleich, liefert ein Mischer ein Signal, mit dessen Hilfe die Resonatorlänge des Lasers über einen Piezospiegel nachgeregelt wird. Die gemessenen Zeitschwankungen in der Laser-Synchronisation (time jitter) liegen bei weniger als 200 fs. Die erste erfolgreiche Abtastung der Elektronenbunches am PSI-Linac ist vor kurzem gelungen. Abbildung 50 zeigt die Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers und des Diodendetektors auf einem 2 GHz-Oszilloskop.

Die Analyse der Daten ist noch in Arbeit.

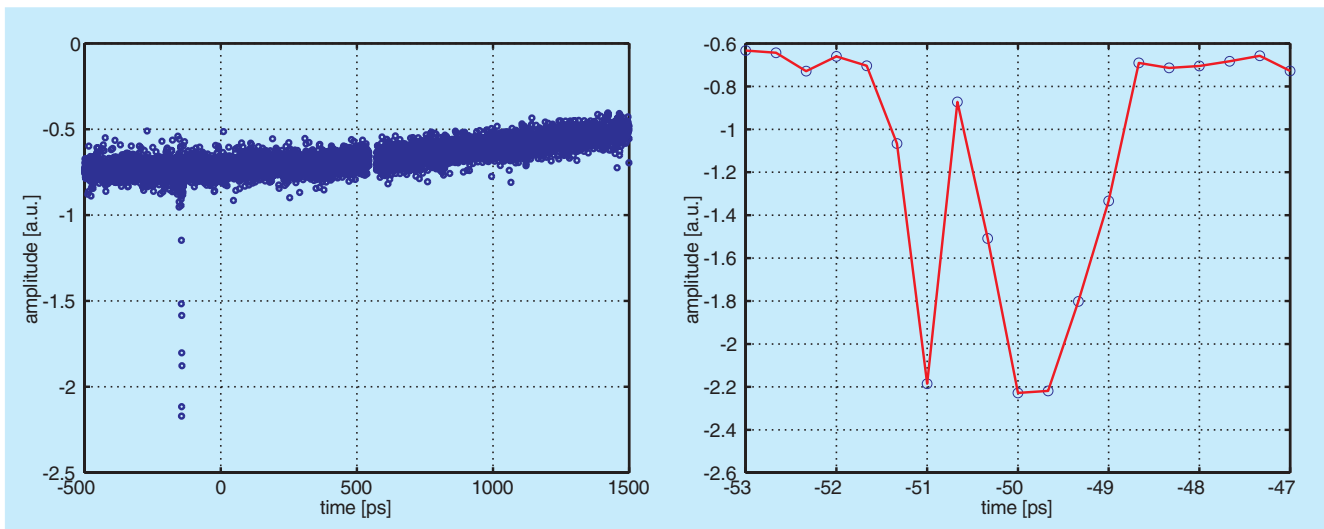


Abbildung 49: Links: Die Signalamplitude des Detektors als Funktion der relativen Verzögerung Δt zwischen Laser- und CTR-Puls. Rechts: vergrößerte Darstellung des Koinzidenzbereichs bei $\Delta t = -50$ ps. Die Struktur innerhalb des Bunches ist nicht real, sondern vermutlich durch time jitter verursacht.

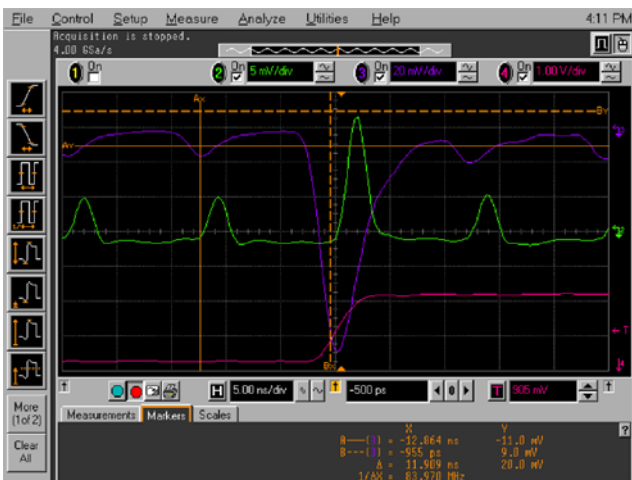


Abbildung 50: Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers (obere Spur) und des Diodendetektors (mittlere Spur). Die Pulse des Titan-Saphir-Lasers (TiSa) haben einen Abstand von 12.3 ns. In der Mitte des Bildes bei $t \approx 0$ sieht man die Überlappung des TiSa-Signals mit dem Puls der optischen Übergangsstrahlung. Die Diodendetektor hat bei $t \approx 0$ ebenfalls ein großes Signal: dies ist ein Beweis dafür, dass der TiSa-Puls genau zu dem Zeitpunkt den ZnTe-Kristall durchläuft, bei dem dieser durch den CTR-Puls des Bunches doppelbrechend gemacht worden ist. Damit ist die Überlappung von TiSa- und CTR-Puls auf einer Pikosekunden-Zeitskala realisiert.

Messung der Kohärenz der FEL-Strahlung

Der VUV-FEL bei DESY arbeitet nach dem Prinzip der Self Stimulated Spontaneous Emission (SASE), das einen sehr langen Undulatormagneten und einen sehr fein kollimierten Elektronenstrahl mit hoher Ladungsdichte voraussetzt. Im ersten Abschnitt des Undula-

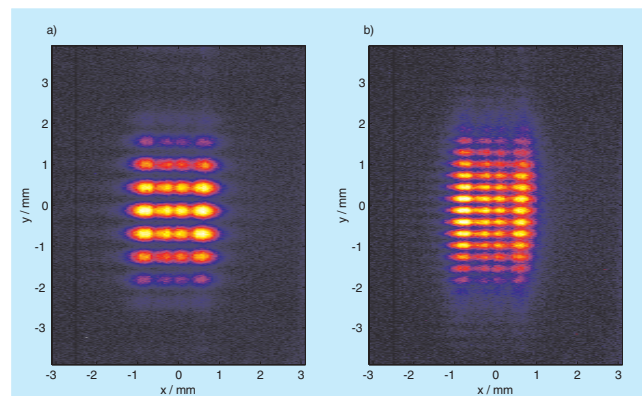


Abbildung 51: Gemessene Beugungsbilder für Doppelspalte mit 0.5 mm bzw. 1 mm Abstand. Die 100 nm FEL-Strahlung wird in einem Fluoreszenzkristall in sichtbares Licht umgewandelt.

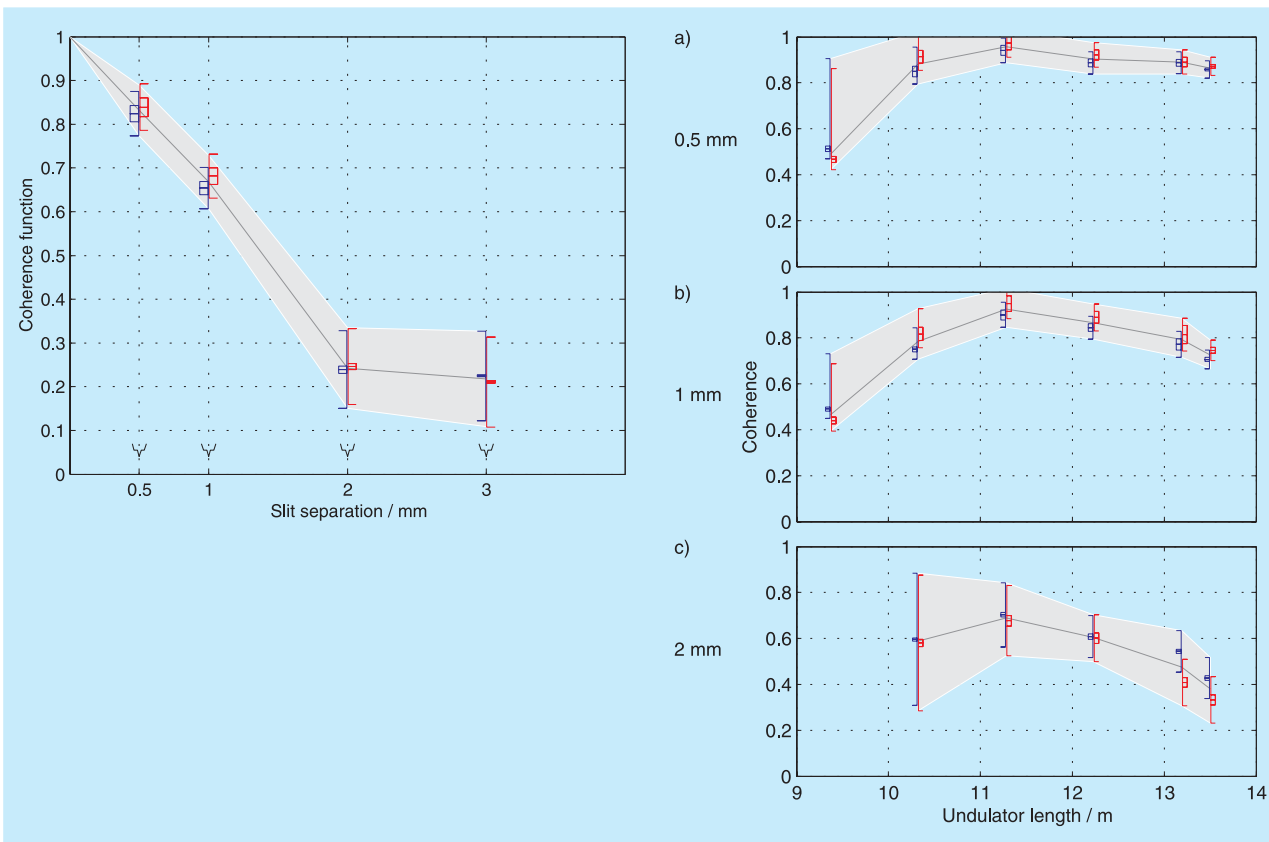


Abbildung 52: Links: Kohärenzgrad der 100 nm FEL-Strahlung als Funktion des Spaltabstands. Rechts: Entwicklung der Kohärenz als Funktion der Undulatorlänge für Spaltabstände von 0.5, 1 und 2 mm.

tors wird spontane Undulatorstrahlung erzeugt, die im weiteren Verlauf des Undulators mit dem Elektronenbunch wechselwirkt und eine räumliche Ladungsdichtemodulation („microbunching“) bewirkt. Dies hat eine kohärente Abstrahlung der Elektronen und ein exponentielles Anwachsen der Lichtintensität zur Folge. Der SASE-Prozess ist hochgradig nichtlinear und nur mit aufwändigen numerischen Rechnungen zu beschreiben.

Zur Bestimmung der transversalen Kohärenz der FEL-Strahlung sind Beugungsexperimente an Doppelspalten, Kreisblenden und kreuzförmigen Öffnungen vorgenommen worden. Hinter dem beugenden Objekt trifft die UV-Strahlung des FEL auf einen Fluoreszenzkristall, wo sie in sichtbares Licht umgewandelt und über ein hochauflösendes Nahaufnahme-Objektiv auf einen CCD-Sensor abgebildet wird. Die Beugungsbilder sind im Nahfeld-Bereich (Fresnel-Beugung) gemessen wor-

den, daher ist eine analytische Beschreibung im Rahmen der Fraunhofer-Näherung nicht möglich. Die numerische Behandlung wurde mit einem eigenen Programm, das auf der Kirchhoff'schen Beugungstheorie beruht, sowie mit einem kommerziellen Programm (GLAD) vorgenommen. Das Auflösungsvermögen des Objektivs sowie die Verbreiterung der Interferenzlinien im Fluoreszenzkristall und die Verringerung ihres Kontrastes durch Streulicht sind in einem Testaufbau ermittelt worden. Die Ergebnisse werden zur Entfaltung der am FEL gemessenen Interferenzbilder verwendet.

Interferenzbilder bei verschiedenen Spaltabständen (siehe Abb. 51) und Blendenöffnungen sind mit Simulationsrechnungen verglichen worden, die mit den theoretisch berechneten Wellenfronten der 100 nm-FEL-Strahlung am Ausgang des Undulators beginnen und die den experimentellen Aufbau mit Doppel-

spalt, Fluoreszenzkristall und CCD-Kamera inklusive aller Auflösungsbegrenzungen und anderer Störeffekte möglichst wirklichkeitsnah nachbilden. Die berechneten und gemessenen Interferenzbilder stimmen sehr gut überein. Der transversale Kohärenzgrad der FEL-Strahlung ist in Abbildung 52 als Funktion des Spaltabstands aufgetragen. Er liegt bei 90% im exponentiellen Anstiegsbereich der FEL-Verstärkungskurve und sinkt auf 80% im Bereich der Sättigung. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit Simulationsrechnungen zum SASE-FEL-Prozess. Die hohe räumliche Kohärenz ist von großer Bedeutung für zukünftige Experimente am VUV-FEL.

Oberflächensupraleitung von Niobproben

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg (Arbeitsgruppe Prof. J. Kötzler) sind systematische Untersuchungen zu den supraleitenden Eigenschaften der Niobleche durchgeführt worden, die zum Bau der TESLA-Resonatoren verwendet werden. Die zylindrischen Proben wurden den gleichen Behandlungsschritten unterworfen wie die Resonatoren: chemische Beizung (buffered chemical polishing BCP), Elektropolitur (EP), Ausbacken bei niedrigen Temperaturen (bake). Die Magnetisierungskurven und die komplexe magnetische Suszeptibilität wurden über einen weiten Temperatur- und Magnetfeldbereich vermessen. Die Volumenparameter stimmen mit Literaturwerten überein, z. B. $T_c = 9.26$ K und $B_{c2}(0) = 410$ mT. In allen Proben wird Oberflächensupraleitung beobachtet, aber das kritische Oberflächenfeld B_{c3} ist größer als nach der Ginzburg-Landau-Theorie erwartet ($B_{c3} = 1.7B_{c2}$), siehe Abbildung 53.

Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die beiden wesentlichen Präparationsschritte, die zu hohen Gradienten in den supraleitenden Resonatoren führen, nämlich die Elektropolitur und das Ausbacken, auch das Oberflächenfeld in den Niobproben erhöhen. Aus der in Abbildung 54 gezeigten Magnetfeldabhängigkeit der komplexen Leitfähigkeit bzw. Resistivität im Bereich $B_{c2} < B < B_{c3}$ kann man weiterhin folgern, dass es zwei verschiedene Phasen der Oberflächensupraleitung gibt: eine kohärente Phase für $B_{c2} < B < B_{c3}^{\text{coh}} = 0.81B_{c3}$, die in einer dünnen Oberflächenschicht des Niobzylinders vorliegt

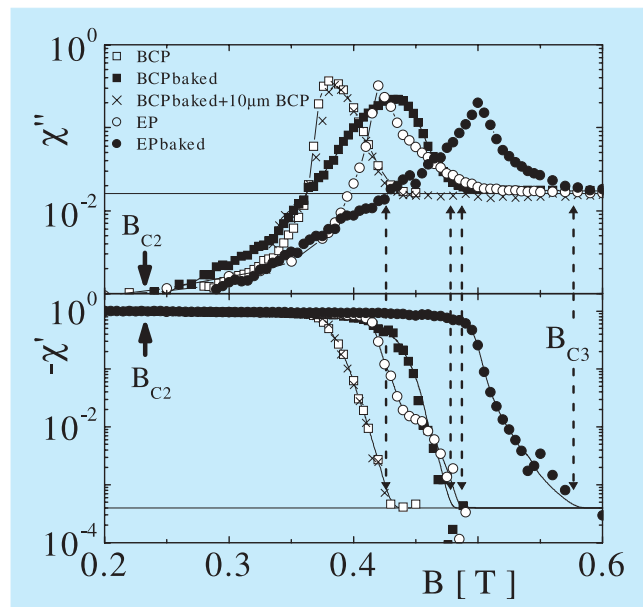


Abbildung 53: Imaginär- und Realteil der komplexen Suszeptibilität bei $T = 5$ K für verschiedene Niobproben: BCP, BCP-bake, EP, EP-bake. Die oberen kritischen Felder B_{c3} sind durch Pfeile angedeutet. Die Ginzburg-Landau-Theorie sagt $B_{c3} = 1.7 B_{c2} \approx 0.39$ Tesla bei $T = 5$ K voraus.

und Abschirmströme erlaubt, welche den gesamten Zylinder umlaufen, und eine inkohärente Phase für $B_{c3}^{\text{coh}} < B < B_{c3}$, bei der nur noch kleine, getrennte Bereiche in dieser Oberflächenschicht supraleitend sind. Die kohärente Phase ist bei den elektropolierten Proben wesentlich deutlicher ausgeprägt, und dies erklärt auch die Überlegenheit der EP-Resonatoren.

Mikroskopische Oberflächenanalyse

Die Oberflächenanalyse von Niobproben ist ein wichtiges Hilfsmittel zum Verständnis der Vorgänge in supraleitenden Resonatoren. Am Institut für Angewandte Physik (IAP) steht eine Ultrahochvakuumanlage zur Oberflächenanalyse und -präparation zur Verfügung, die von DESY im Rahmen eines Kooperationsvertrages genutzt werden kann. Sie besteht aus vier Teilrezipienten, die durch ein Probentransfersystem verbunden sind:

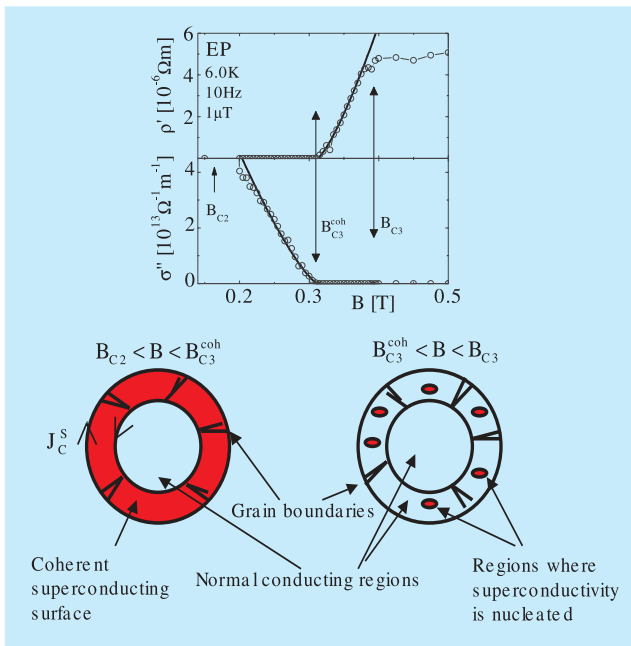
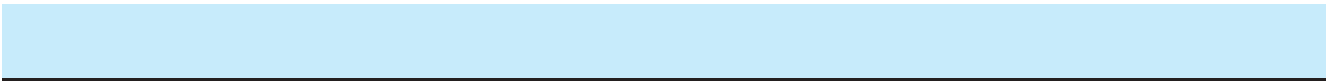


Abbildung 54: Oben: Der Realteil ρ' der komplexen Resistivität und der Imaginärteil σ'' der Leitfähigkeit als Funktion des Magnetfeldes. Unten: Schematische Darstellung der kohärenten und inkohärenten Oberflächensupraleitung.

- Luftschleuse
- RHEED-System (Reflected High Energy Electron Diffraction)
- XPS-System (X-ray Photoelectron Spectroscopy) mit Argon-Ionenkanone und vorgeschalteter Präparationskammer
- STM-System (Scanning Tunneling Microscope)

Im Jahr 2003 ist das nicht mehr funktionsfähige XPS-System von uns repariert und in Betrieb genommen worden. Bei Testmessungen an einer Niobprobe wurden Oberflächenbeschaffenheit und chemische Wertigkeit der Konstituenten bestimmt. Für die Gruppe MVP wurde eine Probe untersucht, die von einem kupferbeschichteten TTF-Edelstahlbalg stammt. An der Oberfläche und bis in 200 nm Tiefe zeigte sich Kohlenstoff als dominierende Verunreinigung. Der Aussagewert der Messungen ist allerdings durch das bislang erzielte Arbeitsvakuum von 10^{-8} mbar gemindert. Zur Zeit wird an der Verbesserung des Vakuums gearbeitet. Diese Apparatur wird auch für künftige Materialanalysen von großem Nutzen für DESY sein.



Theoretische Physik

Sprecher: F. Schrempp

Das wissenschaftliche Programm der DESY Theorie-Gruppe und des II. Instituts für Theoretische Physik hatte folgende Schwerpunkte:

- HERA-Physik und QCD,
- Gittereichtheorie,
- B-Physik,
- Collider-Physik,
- Neutrino-Physik und Kosmologie,
- Vereinheitlichte Theorien,
- Stringtheorie,
- Quantengravitation.

HERA Physik und QCD

Small-x Physik und Saturation

Aus theoretischer Sicht besteht eine der wichtigsten Aufgaben von HERA und anderen Teilchenbeschleunigern darin, verschiedene Aspekte der starken Wechselwirkung quantitativ zu erforschen. Ein bedeutender Zweig der Quantenchromodynamik (QCD) befasst sich mit dem Verständnis der Physik im kinematischen Bereich sehr kleiner Bjorken- x , deren experimentelle Untersuchung bei HERA begonnenen und inzwischen an anderen Plätzen aufgenommen worden ist. Ein Überblick über den gegenwärtigen Stand von Phänomenologie und Theorie der small- x Physik wurde von der Small- x Collaboration in [DESY 03-220] präsentiert. Dies ist der zweite Übersichts-Artikel der internationalen Small- x Collaboration, die sich in regelmäßigen Abständen trifft (bisher immer in Lund, Schweden) und dabei den jeweils aktuellen Stand der Kenntnisse aufarbeitet.

Eines der wichtigsten experimentellen Ergebnisse von HERA ist der starke Anstieg der Gluondichte bei kleinem x . Aufgrund der Unitarität erwartet man schließlich eine Dämpfung dieses Anstiegs und entsprechend einen Sättigungszustand der Gluonen („Saturation“). In einem aussichtsreichen Zugang wird dieses Sättigungsphänomen mit einem Vielteilchen-Quantenzustand hoher Besetzungszahl, dem „Farbglass-Kondensat“ assoziiert, welches entsprechend als starkes klassisches Feld proportional zu $1/\sqrt{\alpha_s}$ angesehen werden kann. In diesem neuartigen Bereich hoher Gluonzahl bei hinreichend kleiner Eichkopplung α_s hat man große Klassen von störungstheoretischen Beiträgen aufzusummieren; bei sehr kleinen x - und Q^2 -Werten ist jedoch ein Zusammenbrechen der üblichen Störungstheorie zu erwarten, der den Übergang zur starken Wechselwirkung einleitet.

Im Rahmen der Störungstheorie steht zur Zeit eine nichtlineare Erweiterung der QCD-Evolutionsgleichungen im Mittelpunkt des Interesses: die Balitsky-Kovchegov (BK) Gleichung. Diese Gleichung liefert einen vielversprechenden theoretischen Rahmen für die Beschreibung des Sättigungsphänomens. Bisher ist diese Gleichung nur in einer vereinfachten Form analysiert worden; in [DESY 03-075] wurde erstmals eine numerische Untersuchung der vollen Gleichung durchgeführt, insbesondere der Abhängigkeit der Dipoldichte vom Impaktparameter b .

Phänomenologische Modelle, die auf genäherten Lösungen der BK-Gleichung basieren, wurden für verschiedene Streuprozesse formuliert und untersucht: J/ψ Produktion in Photo- und Elektroproduktion [DESY 03-011] und tiefunelastische Streuung an Kernen [DESY 03-050, 089, 116].

Eine wichtige Anwendung der small- x Physik und der Saturation ist die Wechselwirkung von hochenergetischen Neutrinos mit Protonen und Kernen in der Atmosphäre. Eine möglichst genaue Kenntnis dieser Wechselwirkung ist für astrophysikalische Untersuchungen

sehr wichtig. Der Wirkungsquerschnitt wird näherungsweise durch den tiefunelastischen νp Wirkungsquerschnitt bei sehr kleinen x beschrieben. In [DESY 03-171] werden die Vorhersagen verschiedener Partondichten in einem Saturationsmodell miteinander verglichen.

Für die Untersuchung der Saturation im Rahmen der QCD hat sich das Farb-Dipolbild als besonders geeignet erwiesen, das bisher nur für totale Wirkungsquerschnitte diskutiert worden ist. In [DESY 03-010] wurde dieses Bild auf Streuamplituden mit nichtverschwindenden Impulsüberträgen verallgemeinert. Diese Erweiterung wird benötigt, um z. B. in der tiefunelastischen Diffraktion die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes vom Impaktparameter zu untersuchen. Es wird erwartet, dass Saturation in der Diffraktion besonders empfindliche experimentelle Tests erlaubt.

Instantonen und Saturation

In einem komplementären theoretischen Zugang zur Saturation wurden nicht-perturbative, klassische Feldkonfigurationen der QCD untersucht. Als explizit bekannte Fluktuationen des Gluon-Feldes proportional zu $1/\sqrt{\alpha_s}$ stellen „Instantonen“ einen besonders interessanten, konsistenten Zugang zum Saturationsphänomen dar und wurden intensiv weiterverfolgt [hep-ph/0301177, DESY 03-217]. Wie aus Gittersimulationen bekannt ist, tritt in diesem Rahmen eine charakteristische neue Skala auf, die mittlere Instantongröße, $\langle \rho \rangle \approx 0.5$ fm, welche mit der Saturationsskala identifiziert werden konnte: Bei der Streuung eines $q\bar{q}$ -Farbdipols der Größe r am Nukleon tritt für $x \rightarrow 0$ Saturation ein, wenn der geometrische Wirkungsquerschnitt πr^2 (entsprechend der Dipolfläche) die Fläche $\pi \langle \rho \rangle^2$ des Hintergrund-Instantons übersteigt [hep-ph/0301177].

Ein wichtiges Ergebnis [DESY 03-217] im Instanton-Zugang ist die Identifikation des Farbglass Kondensats mit dem QCD-Sphaleron, einem wohlbekannten, kohärenten Multi-Gluon Zustand auf dem Gipfel der Potenzialbarriere, die benachbarte, topologisch nicht äquivalente Vakua trennt. Diese Identifizierung gelingt im Rahmen der „Valley“-Näherung mit Hilfe von Gitterdaten der UKQCD-Kollaboration. In Übereinstimmung mit neuen Simulationen zur elektroschwachen $B + L$ -Verletzung wurde erstmals mittels QCD-Gitterdaten

die Gültigkeit der Valley-Näherung vom Tunnelbereich ($E \approx 0$) bis zum Sphaleron ($E \approx m_{\text{sph}} \approx 1/\alpha_s \langle \rho \rangle$) gezeigt [DESY 03-217].

Leading-log Summation

Tiefunelastische Streuung bei kleinen x wird weitgehend von Gluonen dominiert; der Austausch von Fermion-Antifermion Paaren stellt jedoch eine wichtige Korrektur zum Gluonaustausch dar, die im kinematischen Bereich nicht zu kleiner x keinesfalls vernachlässigt werden kann. Der Streuprozess zweier virtueller Photonen stellt einen attraktiven Rahmen dar, in dem die Vorhersagen der QCD für den Hochenergielimes zuverlässig getestet werden können. Für diesen Prozess wurde in [DESY 03-105] der Einfluss von Fermion-Antifermion Austausch untersucht: bei LEP Energien sind diese Beiträge noch sehr wichtig, während sie bei einem zukünftigen Linear Collider (TESLA) eine geringere Rolle spielen werden. Das Hochenergieverhalten der doppelten Energie-Logarithmen, wie sie für Fermionenaustausch in der QCD charakteristisch sind, ist darüber hinaus auch von allgemeinerem theoretischen Interesse.

Im Rahmen der BFKL-Näherung der QCD wird die Existenz eines Odderon vorhergesagt, eines aus drei „reggeisierten“ Gluonen bestehenden Zustandes im Austauschkanal. Die diffraktive Produktion des η_c Teilchens in der tiefunelastischen Streuung stellt einen vielversprechenden Kandidaten zum Nachweis dieses Odderons in der störungstheoretischen QCD dar. In [DESY 03-048] wird der Wirkungsquerschnitt dieses Streuprozesses abgeschätzt.

Zu den fundamentalen Eigenschaften der BFKL-Amplituden in der QCD gehören die „Bootstrap Relationen“. Dies sind nichtlineare Beziehungen zwischen verschiedenen elastischen Streuamplituden und Vierteilchen-Produktionsamplituden, deren Gültigkeit für die s -Kanal Unitarität notwendig ist. Die Tatsache, dass die in der BFKL-Näherung berechneten Streuamplituden diese Relationen erfüllen, kann auch als Nachweis ihrer inneren Konsistenz angesehen werden. In der führenden Ordnung sind diese Relationen seit langem bekannt und bewiesen. Ihre Verifikation in der nächstführenden Ordnung (NLO Näherung) hingegen ist erst vor einigen Jahren unternommen worden, und ihre Aus-

dehnung auf inelastische Produktionsprozesse war bisher nicht bekannt. In [DESY 03-083] sind Bootstrap-Bedingungen für NLO Produktionsamplituden formuliert worden, und es wurden Konsistenzbedingungen für Produktionsvertices hergeleitet.

Next-to-Leading-Order Rechnungen

Die Berechnung des Photon Impaktfaktors in der NLO Näherung ist aus mehreren Gründen von hohem Interesse. Zum einen gibt es starke Hinweise darauf, dass im bei HERA untersuchten kinematischen Bereich kleiner x an Stelle der kollinearen Faktorisierung die k_T -Faktorisierung in der QCD verwendet werden muss. In diesem Zusammenhang wird die NLO Näherung des Photon Impaktfaktors benötigt. Sie ist außerdem notwendig für den experimentellen Nachweis des BFKL Pomerons im $\gamma^*\gamma^*$ Streuprozess oder in der Produktion von so genannten Forward-Jets in der tiefunelastischen ep-Streuung. An dieser anspruchsvollen Rechnung wird seit mehreren Jahren gearbeitet. Die jüngste Veröffentlichung im Rahmen dieses Programmes ist die Doktorarbeit [DESY-THESIS 2003-036], in der erstmals numerische Resultate der reellen Korrekturen berechnet werden.

Ebenfalls von grundlegender Wichtigkeit für die Gluon Strukturfunktion bei kleinen x ist die Kenntnis der BFKL Green Funktion in der NLO Näherung. In [DESY 03-060] wird eine verbesserte Version der bisherigen Green Funktion vorgeschlagen, die in voller Übereinstimmung mit der Renormierungsgruppe ist und die numerische Genauigkeit erheblich verbessert.

In [DESY 03-027] wurden Momente der differentiellen Energie- und Winkelverteilung für inklusive Produktion von B-Mesonen, $e^+e^- \rightarrow B\bar{B}X$, in Ordnung α_s^2 berechnet. Es wurde gezeigt, dass sich in geeigneten Verhältnissen solcher Momente nicht-perturbative Korrekturen sowie große Logarithmen der Form $\ln(E_{\text{CM}}/m_b)$ kürzen. Die theoretischen Vorhersagen stimmen sehr gut mit neueren Daten des SLD Experiments überein und erlauben eine Bestimmung von α_s .

Nichtrelativistische QCD

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz so genannter

Farboktett-Prozesse in der Natur voraus, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Im Rahmen dieser Theorie wurden Vorhersagen bereitgestellt für die inklusive Erzeugung prompter J/ψ -Mesonen in tiefunelastischer Neutrino-Nukleonstreuung über den geladenen Strom [DESY 03-107], sowie in polarisierten Hadron-Hadron-, Photon-Hadron- bzw. Photon-Photon-Stößen [DESY 03-168], die mit Messungen von CHORUS, bei RHIC-Spin, im SLAC-Experiment E161 bzw. bei TESLA verglichen werden können. Eine neue Messung der unpolarisierten Hadroproduktion bei RHIC stimmt mit der NRQCD deutlich besser überein als mit dem Farbsingulettmodell. Es wurde gezeigt, dass die Winkelverteilungen der χ_{c1} - und χ_{c2} -Mesonen am Tevatron wichtige Informationen über Farboktettprozesse enthalten und wie diese erschlossen werden können [DESY 03-96]. Für die assoziierte Erzeugung eines Υ -Mesons mit einem h^0 - bzw. A^0 -Higgs Boson des minimalen supersymmetrischen Standardmodells wurden in gewissen, experimentell erlaubten Parameterbereichen Signalraten vorhergesagt, die am LHC sichtbar sein sollten [DESY 04-023].

Die nichtrelativistische Schwellendynamik des Bottom-Antibottom-Systems kann weitgehend störungstheoretisch beschrieben werden. Dies geschieht zweckmäßigerweise mit Hilfe der Potenzial-NRQCD, einer effektiven Feldtheorie, welche aus der NRQCD durch Ausintegration der weichen Moden und Potenzial-Gluonen hervorgeht. Die Vorhersagen dieser Theorie können mit Hilfe eines Systems nichtrelativistischer Renormierungsgruppengleichungen wesentlich verbessert werden. Unter Verwendung dieser Methode wurden die nächstführenden logarithmischen Korrekturen zur Hyperfeinaufspaltung von schwerem Quarkonium aufsummiert. So konnte eine zuverlässige Vorhersage gewonnen werden für die Masse des η_b -Mesons [DESY 03-172], für das kürzlich ein Signalergebnis bei CLEO gesehen wurde.

Produktion von Charm-Mesonen

Theoretische Untersuchungen zur D^* Erzeugung in $\gamma\gamma$ und γp Reaktionen im so genannten massiven variablen Flavourzahl-Schema (massive VFNS) wurden im Jahre

2003 fortgesetzt. In diesem Schema wird die von Null verschiedene Charmquark-Masse voll berücksichtigt, und zwar in der Form, dass für große p_T die Theorie mit masselosem Charm reproduziert wird. Dieses Vorgehen erlaubt es einerseits, Terme proportional zu $\ln(p_T^2/m_c^2)$ in Form von D^* Fragmentationsfunktionen, die universell sind, aufzusummieren und andererseits, Beiträge proportional m_c^2/p_T^2 voll zu berücksichtigen. Dieser Ansatz wurde zum ersten Mal für den direkten Anteil des Prozesses $\gamma\gamma \rightarrow D^*X$ im Jahre 2001 ausgearbeitet [DESY 01-134]. In [DESY 03-014] wird der einfach aufgelöste Anteil für diese Reaktion behandelt und ein Vergleich mit LEP2 Daten durchgeführt. Hierbei wurden der direkte, einfach aufgelöste und der zweifach aufgelöste Anteil, der noch durch die $m_c = 0$ Theorie approximiert wird, addiert. In [hep-ph/0311062] wurde das massive VFNS Schema auf die Photoproduktion von D^* Mesonen bei HERA angewandt und mit neuesten ZEUS-Daten verglichen. Es ergab sich weitgehend gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Daten. Ferner wurden damit ältere Rechnungen mit masselosen Charmquarks bestätigt.

Verallgemeinerte Partondichten

Ein Großteil unserer Kenntnisse über die Quark-Gluon Substruktur des Protons stammt aus der Messung von Partondichten, z. B. in der tiefunelastischen Streuung. Wichtige Aspekte der Struktur sind jedoch auf diese Weise nicht zugänglich. Insbesondere geben Partondichten Aufschluss über den Impuls von Quarks oder Gluonen entlang der Bewegungsrichtung eines schnell bewegten Protons, nicht jedoch über die Struktur senkrecht zu dieser Richtung. Solche Information kann jedoch in geeigneten exklusiven Streuprozessen mit einem Proton im Endzustand erhalten werden und wird durch so genannte „verallgemeinerte Partondichten“ beschrieben. Durch geeignete Observablen kann insbesondere die räumliche Verteilung von Quarks und Gluonen in der Transversalebene untersucht werden, sowie der Beitrag des Bahndrehimpulses von Quarks und Gluonen zum Gesamtspin des Nukleons. Man erwartet, dass solche Information wertvolle Hinweise auf die QCD-Dynamik im Bereich starker Kopplung liefern wird. Die relevanten Prozesse wie exklusive Produktion von Mesonen oder Photonen werden insbesondere in den Experimenten HERMES, H1 und ZEUS gemessen. In einem Übersichtsartikel [DESY-THESIS

2003-018] wurde versucht, das bestehende Wissen in diesem seit etwa 1996 sehr aktiven Feld zusammenzutragen und dabei wesentliche physikalische Fragen und offene Probleme herauszuarbeiten.

In gleicher Weise können auch Übergangsprozesse vom Proton zu einem anderen Hadron beschrieben werden. Dies bietet die Möglichkeit, die Struktur von Resonanzen zu studieren, die aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer nicht als Strahl oder Target in Streuexperimenten in Frage kommen. In [DESY 03-200] wurde vorgeschlagen, auf diese Weise die Struktur des erst kürzlich entdeckten Pentaquark-Baryons Θ^+ bei kleinen Abständen zu untersuchen. Die dafür nötigen Messungen könnten bereits bei HERMES möglich sein.

Gittereichtheorie

Die Aktivitäten im Bereich Gittereichtheorie konzentrierten sich auf die Bestimmung von effektiven Kopplungskonstanten („Gasser-Leutwyler-Konstanten“) der chiralen Störungstheorie aus Simulationsdaten. Langfristig erhofft man sich dadurch Aufschluss über phänomenologische Fragen wie die Möglichkeit eines masselosen up-Quarks oder der Erklärung der $\Delta I = 1/2$ -Regel. Weitere Aktivitäten im Bereich Gittereichtheorie umfassen die Bestimmung und globale Analyse von Zerfallskonstanten von D- und B-Mesonen, die von zentraler Bedeutung für die Flavour-Physik sind.

Simulationen mit leichten Quarks

Eine wichtige Bedingung bei der Bestimmung der Gasser-Leutwyler-Konstanten ist, dass die dynamischen Quarkmassen klein genug sein müssen, um den Gültigkeitsbereich der bekannten Formeln der chiralen Störungstheorie zu erreichen. Die Simulationen müssen unter Berücksichtigung der dynamischen Effekte der Quark-Felder (das heißt „unquenched“) durchgeführt werden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Rechenleistung und die Effektivität der Algorithmen. Für die Rechnungen wurden die Rechneranlagen des NIC in Zeuthen und Jülich und das PC-Cluster bei DESY Hamburg eingesetzt.

Die qq+q-Kollaboration hat in den letzten Jahren einen geeigneten Algorithmus für kleine Quarkmassen entwickelt. Die ersten Resultate, die mit diesem so genannten TSMB-Algorithmus erreicht wurden, zeigen das typische qualitative Verhalten, das in der chiralen Störungstheorie erwartet wird [DESY 03-003, 019, 072, 148]. Die Abschätzungen für die Gasser-Leutwyler-Konstanten, die das Verhalten der Pion-Masse und der Pion-Zerfallskonstante als Funktion der kleinen Quark-Massen beschreiben, sind im phänomenologisch erwarteten Bereich. Die Extrapolation zum Kontinuumslimites konnte bis jetzt noch nicht durchgeführt werden, wird aber in der nahen Zukunft mit den bereits bekannten Methoden erreichbar sein.

Gitter-QCD im ϵ -Regime

Eine weitere Methode zur Bestimmung der effektiven Kopplungskonstanten der chiralen Störungstheorie ist die Untersuchung des so genannten ϵ -Regimes der QCD. Hierbei wird die Theorie in einem endlichen Volumen für beliebig kleine Quarkmassen formuliert. Wie von Leutwyler und Smilga gezeigt, spielt in dieser Situation die Topologie der Eichfelder eine besondere Rolle. Die numerische Berechnung von Korrelationsfunktionen im ϵ -Regime in verschiedenen topologischen Sektoren ermöglicht die Bestimmung der effektiven Kopplungskonstanten durch den Vergleich mit den analytischen Ausdrücken. Die Verwendung von Gitter-Fermionen mit exakter chiraler Symmetrie ist hierbei von besonderem Vorteil, da die analytischen Ausdrücke ohne Einschränkung in der Gitterregularisierung gelten.

Im chiralen Limes divergiert die Korrelationsfunktion der pseudoskalaren Dichte. Ihr Residuum ist jedoch durch die Nullmoden des Dirac-Operators vollständig bestimmt und kann in chiraler Störungstheorie berechnet werden. Die entsprechenden Ausdrücke werden durch die Pion-Zerfallskonstante parametrisiert. Die durch Nullmoden gesättigte Korrelationsfunktion konnte erstmals durch numerische Simulation für verschiedene Gitterabstände und Volumina in der „quenched“ Näherung der QCD bestimmt werden [DESY 03-195]. Trotz mehrerer, bislang noch nicht kontrollierter systematischer Effekte, ist das Resultat für die Pion-Zerfallskonstante im chiralen Limes mit dem phänomenologisch erwarteten Wert verträglich.

QCD und Random Matrix Theory

In einem weiteren Projekt unter Verwendung von Ginsparg-Wilson-Fermionen wurde die Verteilung der Eigenwerte des Dirac-Operators untersucht. Dies ist von besonderem Interesse für das Verständnis der spontanen chiralen Symmetriebrechung. Die Bildung eines chiralen Kondensats wird hierbei über die so genannte Banks-Casher-Beziehung durch die Akkumulation kleiner Eigenwerte des Dirac-Operators erklärt. Quantitative Voraussagen für die Verteilung der Eigenwerte werden insbesondere durch die Random Matrix Theory gemacht. Mit bisher nicht gekannter Präzision konnte die Verteilung der Eigenwerte nun aus Simulationen der „quenched“ QCD für eine Reihe von Gitterkonstanten und Volumina berechnet werden [DESY 03-135]. Hierbei ergab sich, dass Random Matrix Theory eine gute Beschreibung der Eigenwertverteilung liefert, sofern das physikalische Raumzeit-Volumen größer als 5 fm^4 ist.

Ferner lässt sich aus den Gitterdaten ein Wert für das chirale Kondensat bestimmen, der im erwarteten phänomenologischen Bereich liegt. Die verblüffend genaue quantitative Übereinstimmung der Eigenwertverteilungen der QCD mit denen der Random Matrix Theory ist in Abbildung 55 gezeigt.

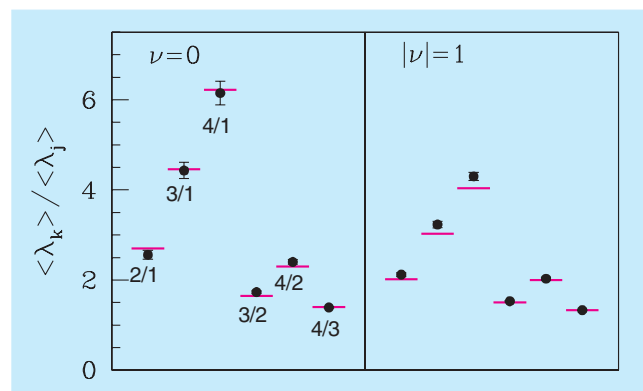


Abbildung 55: Verhältnisse der Erwartungswerte der Eigenwerte des Dirac-Operators in verschiedenen topologischen Sektoren. Die Voraussagen der Random Matrix Theory sind als horizontale Striche gekennzeichnet.

Gitterresultate in der B-Physik

Die Werte der B-Meson-Zerfallskonstanten sowie des B-Parameters der B^0 - $\bar{B}^0$ -Mischung werden für die Analyse der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix und die Bestimmung ihrer CP-verletzenden Phase benötigt. Gittersimulationen der QCD sind seit einiger Zeit die wichtigste Quelle dieser Information. Aufgrund der immer noch großen systematischen Fehler dieser Größen stellt sich die Frage einer unifizierenden Analyse von Gitter-Resultaten verschiedener Kollaborationen im Stile der Particle Data Group. Der Versuch einer gemeinsamen Analyse wurde bei der EPS03-Konferenz in Aachen vorgestellt [DESY 03-174].

Gitterdaten sind auch von großer Bedeutung für semi-leptonische Zerfälle im charm-Sektor. Wie in einem Summary Talk beim CKM-Workshop in Durham ausgeführt wurde [DESY 03-173], ist eine Berechnung der entsprechenden Formfaktoren für künftige Experimente an „High-Luminosity Charm Factories“ wie CESR-c von großem Interesse.

PC-Cluster bei DESY

Im Rahmen des LatFor-Proposals wurden verschiedene Rechnerplattformen verglichen und ihre Eignung für künftige Großprojekte der Gittereichtheorie bewertet [DESY 03-145]. Hierbei gelten mittlerweile auch PC-Cluster als geeignete und flexible Systeme, die komplementär zu Eigenentwicklungen wie apeNEXT für Simulationen eingesetzt werden können. Beispielsweise wurde das oben beschriebene Projekt zur Bestimmung der Eigenwertverteilungen des Dirac-Operators auf dem relativ kleinen Cluster mit 64 Prozessoren bei DESY Hamburg durchgeführt. Die Erfahrungen mit PC-Clustern bei DESY wurden in einem Konferenzbeitrag vorgestellt [DESY 03-073].

B-Physik

Präzisionsphysik von Übergängen mit schweren Quarks ist ein wesentlicher Bestandteil der seit einigen Jahren laufenden und auch im Jahr 2003 fortgesetzten Untersuchungen in der Theorie-Gruppe und am II. Institut für theoretische Physik der Universität Ham-

burg. Vor allem die Experimente BABAR und BELLE haben dafür neue und genauere Messungen der Materie-Antimaterie Asymmetrie in B Zerfällen und den seltenen B-Mesonen Zerfällen geliefert. Die Zerfälle $B \rightarrow X_s(\gamma, \ell^+ \ell^-)$ und $B \rightarrow X_d(\gamma, \ell^+ \ell^-)$ sind wichtige Quellen für die Untersuchung der Physik in den so genannten elektroschwachen Pinguin-Amplituden [DESY 03-046]. Es besteht ein großes Interesse an der Berechnung der QCD-Strahlungskorrekturen für die Zerfallsrate $\Gamma(B \rightarrow X_s \gamma)$ zur Ordnung des next-to-next-to-leading logarithm (NNLL). Ein Anfang in diese Richtung wurde durch die Berechnung der Beiträge von fermionischen Loops gemacht [DESY 03-013]. Auch wesentliche Teile der NNLL Matrixelemente für die Operatoren des Übergangs $B \rightarrow X_s \gamma$ wurden gerechnet. Die nichtleptonischen Zerfälle der B-Mesonen sowie der gebundenen $b\bar{b}$ Zustände, besonders des $\Upsilon(1S)$, spielen eine wichtige Rolle, um die QCD Dynamik in Systemen mit schweren Quarks zu entschlüsseln. In diesem Zusammenhang hat die theoretische Untersuchung der inklusiven Zerfälle $B \rightarrow \eta' X$ und $\Upsilon(1S) \rightarrow \eta' X$ eine quantitative Abschätzung der QCD-Pinguin-Amplituden im Standardmodell ermöglicht [hep-ph/0304278, hep-ph/0307092].

Die gemessene CP Asymmetrie in den Zerfällen $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$, $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_L$ liefert eine genaue Messung des inneren Winkels β im Unitaritätsdreieck: $\sin 2\beta = 0.736 \pm 0.049$. Die Experimente BABAR und BELLE haben im Jahr 2003 die ersten Messungen der zeitabhängigen CP Asymmetrie in den Zerfällen $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ und $\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ veröffentlicht. Die aktuellen Messungen liefern wichtige Hinweise auf den Winkel α des Unitaritätsdreiecks. Sie wurden zusammen mit anderen Messungen der CP Asymmetrien und der CKM Matrix phänomenologisch untersucht. Diese Analyse liefert einen Mittelwert von $\alpha = 105^\circ \pm 12^\circ$ [hep-ph/0312303]. Die Messungen der Winkel α und β sind mit deren indirekten Abschätzungen innerhalb des Standardmodells in sehr guter Übereinstimmung. Das führt zum Schluss, dass die CP Asymmetrie in Quarkübergängen durch die Phase in der CKM Matrix dominiert ist.

Collider-Physik

Um die offene Frage der elektroschwachen Symmetriebrechung im Standardmodell schlüssig zu beant-

worten, sind Experimente bei sehr hohen Energien erforderlich. Selbiges gilt auch für die Lösung von Problemen, die von der Einbettung des Standardmodells in eine übergeordnete Theorie ausgehen, in der die Gravitationswechselwirkung in die Teilchenphysik eingebaut wird. Eine Vielzahl theoretischer Untersuchungen zur Higgs-Physik und möglichen Alternativen sowie zur Supersymmetrie ist durchgeführt worden, in denen das Potenzial des im Bau befindlichen Protonencolliders LHC sowie der im Design-Stadium befindlichen e^+e^- -Linearcollider für diese Komplexe studiert wurde.

Higgs-Physik

Das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung erklärt die intrinsischen Massen der Quarks, Leptonen und Eichbosonen durch ihre Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld, dem im einfachsten Fall das Higgs-Boson als neues skalares Teilchen zugeordnet wird. Für die Untersuchung der Higgs-Produktionsprozesse am LHC ist eine genaue Kenntnis der Untergrundprozesse wichtig. Hier stellt die Implementierung der nächstführenden Korrekturen zu $W + 2\text{Jet}$ -Endzuständen in Monte Carlo-Programmen [DESY 03-036] einen wesentlichen Fortschritt dar.

In vielen Modellen ist die Struktur des Higgs-Sektors wesentlich komplizierter als im minimalen Standardmodell, im Extremfall ist selbst ein Kontinuum von Higgs-Zuständen denkbar. Die Frage, ob überhaupt Higgs-Zustände existieren, lässt sich am LHC jedoch unabhängig von der Struktur unzweifelhaft entscheiden [DESY 03-102].

Für eine detaillierte Analyse des Higgs-Potenzials, das im Standardmodell die elektroschwache Symmetriebrechung beschreibt, ist die Bestimmung der Higgs-Selbstkopplung von wesentlicher Bedeutung. Diese Messung ist am LHC nur für große Higgsmassen möglich. Falls hingegen die Masse des Higgs Bosons im durch die LEP-Daten bevorzugten Bereich liegt, ist diese Observable an einem e^+e^- -Collider zugänglich. Die Präzision dieser Messung ist auch durch einen Hadroncollider wesentlich höherer Energie (VLHC) nicht zu übertreffen [DESY 03-035, 103].

Ohne eine Erweiterung des Teilchenspektrums über das minimale Standardmodell hinaus ist das Higgs-Potenzial nicht stabil gegenüber Quantenkorrekturen.

Man erwartet daher Abweichungen in den Higgs-Wechselwirkungen, die durch die Existenz zusätzlicher Freiheitsgrade im TeV-Bereich hervorgerufen werden. In einem modellunabhängigen Zugang lassen sich diese durch einen festen Satz neuer Parameter beschreiben, die in Higgs-Prozessen an einem e^+e^- -Collider gemessen werden [hep-ph/0301097]. Die erwartete Genauigkeit für die verschiedenen Parameter liegt im Bereich von 1–10 %.

Little-Higgs-Modelle

Eine mögliche Alternative zur Supersymmetrie stellen die „Little-Higgs“-Modelle dar, die die Skala der elektroschwachen Symmetriebrechung durch Partnerteilchen gleicher Statistik stabilisieren. Ein minimales Modell dieser Art enthält beispielsweise schwere Kopien der elektroschwachen Eichbosonen ($W_H^\pm$, Z_H und B_H), schwere Skalarfelder als Partner des Higgs Bosons und schwere Fermionen, die dem Top-Quark zugeordnet sind. In [DESY 03-167] wurde die Frage detailliert untersucht, wieweit sich diese Teilchen an Lepton-Collidern in Präzisionsmessungen indirekt bemerkbar machen.

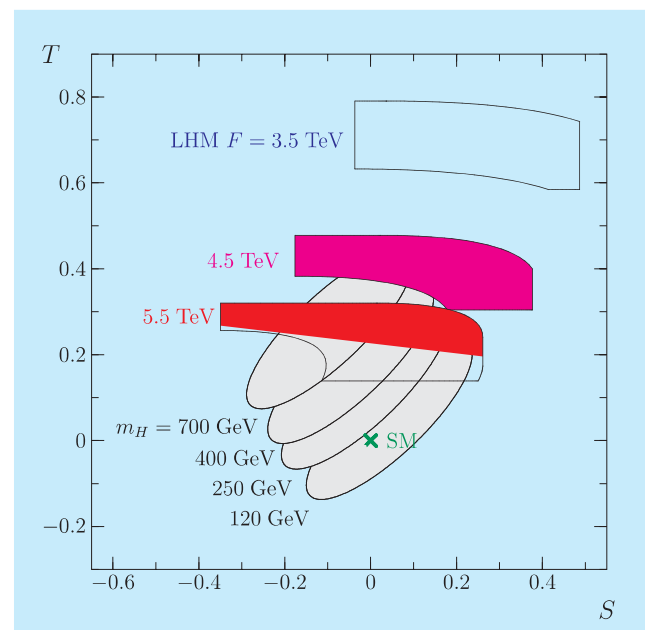


Abbildung 56: Erlaubte (S, T) -Parameterbereiche des minimalen Little-Higgs-Modells (schraffiert) im Vergleich mit LEP-Daten (Ellipsen), dargestellt für verschiedene Higgs-Massen M_H .

Die existierenden Daten lassen bereits Rückschlüsse auf den erlaubten Parameterbereich zu. Abbildung 56 zeigt den Einfluss der schweren Eichbosonen und Skalare auf die Parameter S und T , die bei LEP1 gemessen wurden. Im minimalen Little-Higgs-Modell ist demnach eine Überschneidung des erlaubten Parameterbereichs mit den Daten nur zu erreichen, wenn die charakteristische Skala F des Modells oberhalb von 4 TeV angesiedelt ist. Varianten des Modells erlauben allerdings eine wesentlich niedrigere Massenskala.

An einem zukünftigen e^+e^- -Linearcollider wird ein erweiterter Satz von Observablen der Messung zugänglich, so dass die Analyse prinzipiell eine Rekonstruktion aller Sektoren des Modells zulässt. Die zu erwartenden Effekte sind im Prozentbereich und erfordern deshalb für eine ausreichende Statistik eine hohe Luminosität, wie sie für das TESLA-Design avisiert ist.

Dynamische Symmetriebrechung

Modelle mit dynamischer Brechung der elektroschwachen Symmetrie kommen ohne ein physikalisches Higgs Boson aus und sagen Vektorboson-Streuamplituden vorher, die im TeV-Bereich die Unitaritätsschranke saturieren und womöglich ein ausgeprägtes Resonanzverhalten aufweisen.

Derartige Szenarien wurden exemplarisch in [DESY 03-002] studiert. Weil das Top-Quark mit seiner großen Masse in diesen Modellen eine wichtige Rolle spielt, sind insbesondere Resonanzen in den Streuprozessen $WW/ZZ \rightarrow t\bar{t}$ oberhalb von 1 TeV von Interesse. Allerdings zeigt die numerische Analyse, dass am LHC eine hinreichende Reduktion des Untergrunds, der durch QCD-Abstrahlung in Top-Paarproduktion dominiert ist, auch durch kinematische Schnitte nicht möglich wird, so dass eine Beobachtung derartiger Signale an Hadron-Collidern ausgeschlossen ist. Allein mit einem Lepton-Collider ausreichend hoher Schwerpunktsenergie wären die Effekte nachzuweisen.

Supersymmetrie

Im Rahmen von supersymmetrischen Theorien spielt die hohe Präzision eine herausragende Rolle, mit der Experimente an einem e^+e^- -Linear Collider dieses

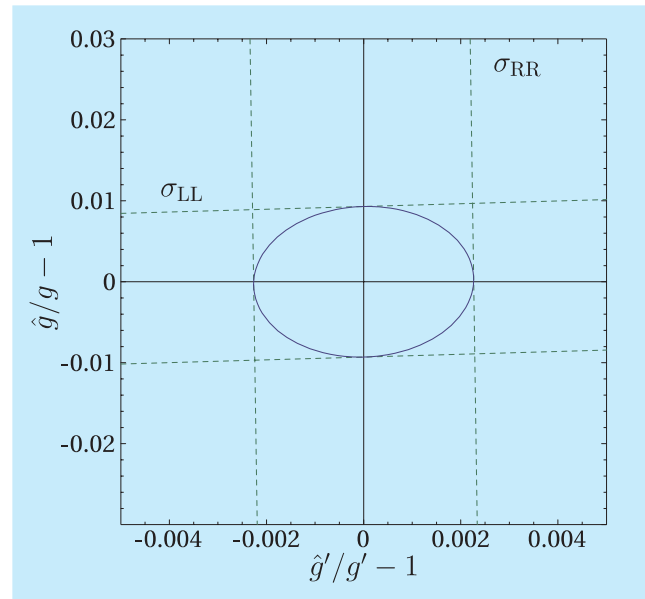


Abbildung 57: Erwartete Präzision der vergleichenden Messung von zwei Yukawa-Kopplungen ($\hat{g}$, $\hat{g}'$) mit ihren korrespondierenden Eichkopplungen (g , g').

neue physikalische Terrain kartographieren können. Besonders wichtig ist dabei die Untersuchung der skalaren Leptonen, also der supersymmetrischen Partner von Elektronen, Myonen und Tauonen und ihrer Neutrinos. Die theoretische Basis wurde bereitgestellt, um ihre Eigenschaften, Massen und Kopplungen, sehr präzise bestimmen zu können.

Abbildung 57 zeigt einen Vergleich von Eichkopplungen und Yukawa-Kopplungen dieser Teilchen, die von der Supersymmetrie als identisch vorausgesagt werden [DESY 03-111] – ein fundamentaler Test der zugrunde liegenden Symmetrie, die Fermionen mit Bosonen vereinheitlicht. Die Messung von Polarisationsphänomenen an einer solchen Maschine erlaubt es, auch andere Basisparameter wie den Mischungswinkel $\tan \beta$ im Higgs-System zu bestimmen [DESY 03-030]. Diese Schritte sind notwendig, um ein so klares Bild der supersymmetrischen Welt zu erstellen, dass sichere Extrapolationen zur Planck-Skala ausgeführt werden können, an der die Gravitation mit den drei Standardwechselwirkungen der Teilchenphysik ultimativ vereinigt werden kann.

Fast alle Untersuchungen zur Supersymmetrie basieren in ihren Details auf der minimalen Formulierung der su-

persymmetrischen Theorie. Superstringtheorien auf der anderen Seite legen die Existenz umfassenderer Komplexe nahe. Einen ersten Schritt in diese Richtung weist die Erweiterung des minimalen Modells mittels isoskalärer Higgs Bosonen. Solche Freiheitsgrade lassen zwar die physikalischen Grundzüge des Higgs-Sektors unberührt, führen jedoch zu faszinierenden Effekten im Spektrum der Higgs Teilchen, ihren Zerfalls- und Produktions-Eigenschaften [DESY 03-066].

Gluinopaare lassen sich an Linearbeschleunigern nur in Photon-Photon-Kollisionen erzeugen, da sich in der Elektron-Positron-Vernichtung die Quark- und Squark-Schleifenbeiträge weitgehend aufheben. Durch Energieabstimmung der Produktionsschwelle kann die Gluino-Masse bei Photon-Collidern bis auf wenige GeV genau bestimmt werden [hep-ph/0303032].

Es sei schließlich angemerkt, dass die Supersymmetrie auch Einfluss auf Reaktionsamplituden von Teilchen des Standardmodells *sui generis* nimmt. Virtuelle supersymmetrische Teilchen verändern Reaktionsraten und Polarisationszustände [DESY 03-004] gegenüber dem Standardmodell.

Neutrino-Physik und Kosmologie

Wechselwirkungen schwerer Majorana-Neutrinos in der thermischen Phase des frühen Universums können die Ursache für die heute beobachtete Materie im Universum sein. Dieser Mechanismus der „Leptogenese“ führt zu Vorhersagen für die Massen der leichten Neutrinos sowie ihrer schweren „Seesaw“-Partner. Im einfachsten Fall der Leptogenese, in dem die Wechselwirkungen des leichtesten Seesaw-Partners dominieren, erhält man die obere Schranke an alle Neutrinomassen $m_{\nu_i} < 0.1 \text{ eV}$ – eine Vorhersage, die in den kommenden Jahren durch Laborexperimente und kosmologische Beobachtungen überprüft werden wird [DESY 03-001].

Die Analyse der solaren und atmosphärischen Neutrinos weist auf Neutrino-Massen hin, die sehr viel kleiner sind als die Massen anderer Leptonen und Quarks. Diese kleinen Neutrino-Massen sind in vielen Modellen durch Physik bei hohen Energieskalen bestimmt. Die Vorhersagen dieser Modelle werden durch Quantenkorrekturen modifiziert. Letztere wurden in [DESY 03-065] für den Fall des Seesaw-Neutrino-Massenoperators syste-

matisch analysiert. Interessanterweise liegt die Größe der Korrekturen häufig im Bereich der Sensitivitäten zukünftiger Experimente. Die genaue Kenntnis der Korrekturen liefert somit wesentliche Aufschlüsse über die Physik bei hohen Energieskalen.

In höherdimensionalen supersymmetrischen Theorien werden Eichkopplungen in der Regel dynamisch durch skalare Felder bestimmt. Damit verändern sich die Kopplungen unter extremen Bedingungen, insbesondere bei hohen Temperaturen im frühen Universum. Dieser Effekt beeinflusst entscheidend die Häufigkeit von Gravitinos. Sollten sie die leichtesten Superpartikeln sein, so kann ihre Existenz die beobachtete dunkle Materie erklären für Gluinomassen im Bereich $0.5 - 2.0 \text{ TeV}$ [DESY 03-078].

Die Existenz komplexer Skalarfelder ist eine unvermeidliche Eigenschaft supersymmetrischer Theorien. Im frühen Universum führen diese Felder häufig zu Entropiefluktuationen, die durch die präzisen Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung stark eingeschränkt sind. In [DESY 03-097] wurde das „Curvaton-Szenario“ für Moduli-Felder, Affleck-Dine-Felder und die Skalarfelder rechtshändiger Neutrinos untersucht und der erlaubte Parameterbereich für die jeweiligen Modelle ausgearbeitet.

Kosmische Neutrinos mit Energien oberhalb von 10^8 GeV könnten Informationen über die Teilchenphysik bei Skalen jenseits der Reichweite von LHC oder eines linearen e^+e^- Beschleunigers liefern. Eine untere Schranke an den bei diesen Energien zu erwartenden Neutrinofluss konnte in [DESY 03-114] gewonnen werden. Demnach sollte es mit in Aufbau befindlichen Neutrino-Teleskopen, wie z. B. IceCube, möglich sein, zum ersten Mal die kosmogenen Neutrinos, die bei unelastischen Stößen von kosmischen Protonen mit Photonen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung entstehen, zu beobachten. Diese Neutrinos könnten auch eine wichtige Rolle in Luftschauerexperimenten spielen: falls nämlich die Neutrino-Nukleonstreuung oberhalb von 10^{10} GeV stark wird – etwa durch elektroschwache Instantoneffekte innerhalb [DESY 03-008, 076] oder durch TeV-Gravitationseffekte außerhalb des Standardmodells – dann könnten die rätselhaften beobachteten kosmischen Strahlen der höchsten Energien oberhalb von 10^{11} GeV in der Tat Neutrinos statt Protonen sein [DESY 03-022, 163].

Vereinheitlichte Theorien

Theorien, die elektroschwache und starke Wechselwirkung aus einer vereinheitlichten Eichtheorie ableiten, gehören zu den am besten motivierten Erweiterungen des Standardmodells. Im Zusammenhang mit der Evidenz für Neutrinomassen und -mischungen ist speziell die Eichgruppe $SO(10)$ von aktuellem Interesse. Die Brechung dieser Symmetrie auf die Standardmodell-Gruppe kann, ausgehend von einer supersymmetrischen Theorie in sechs Raum-Zeit-Dimensionen, auf einfache Weise mit Hilfe einer „Orbifold-Kompaktifizierung“ realisiert werden. In Weiterentwicklung früherer Arbeiten wurde in [DESY 03-045] ein realistisches sechsdimensionales $SO(10)$ -Modell konstruiert, das die detaillierte Struktur der Quark- und Lepton-Massenmatrizen aus der Mischung von Bulk- und Brane-Feldern erklärt. In Modellen, die auf noch größeren Symmetriegruppen, wie E_7 oder E_8 , beruhen, besteht sogar die Möglichkeit, den Teilchengehalt des Standardmodells und das Auftreten von drei Fermion-Generationen aus der höherdimensionalen supersymmetrischen Eichtheorie zu erklären [DESY 03-069] (Abb. 58). Des Weiteren kann die für Orbifold-Modelle charakteristische Symmetriebrechung an Singularitäten in bestimmten Fällen auf die Topologie sehr einfacher „glatter“ Räume zurückgeführt werden [DESY 03-158].

Interessante phänomenologische Implikationen haben fünfdimensionale Theorien, in denen die vierdimensionale Metrik von der fünften Dimension abhängt.

Insbesondere kann die Lokalisierung der Fermionen in der fünften Dimension zu neuartigen Vorhersagen für die Verletzung der Flavour-Quantenzahlen [DESY 03-037] und für die Realisierung des Seesaw-Mechanismus zur Erzeugung von Neutrino-Massen [DESY 03-110] führen.

Die meisten vereinheitlichten Theorien sind supersymmetrisch und haben somit das für die Supersymmetrie charakteristische Problem, die Größe des so genannten μ -Terms im Higgs-Potenzial zu erklären. In [DESY 03-018] wurde ein Lösungsvorschlag vorgestellt, der auf nichtanormalen diskreten R-Symmetrien basiert und im Rahmen von vereinigten $SU(5)$ -Modellen implementiert werden kann. Neben der korrekten Größe des μ -Terms wird dabei ein leichtes Gravitino vorhergesagt.

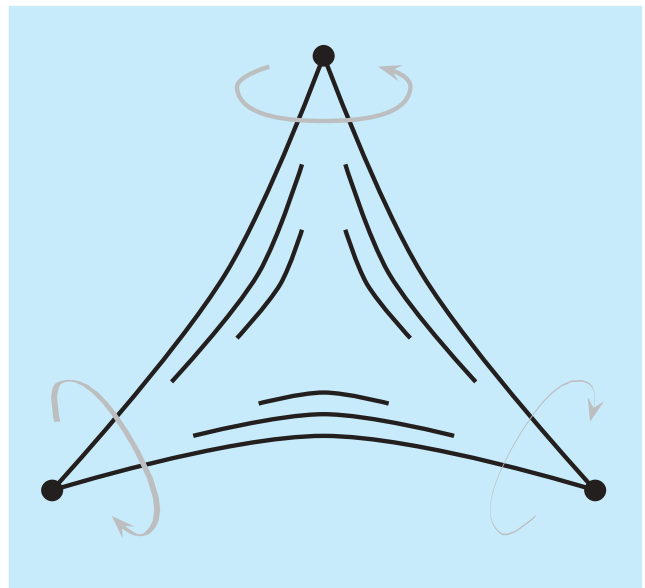


Abbildung 58: Eine mögliche Orbifold-Geometrie zur Brechung der Eichgruppe E_8 durch Wilson-Linien an 3 konischen Singularitäten.

Eine vieldiskutierte Alternative zur Vereinigung der Eichkopplungen bei einer hohen Energieskala stellen stringtheoretische D-Brane-Konstruktionen mit niedriger String-Skala dar. In [DESY 03-203] wurde untersucht, wie es in solchen Modellen zu realistischen Flavour-Strukturen kommen kann und welche untere Schranken an die String-Skala sich in diesem Zusammenhang ergeben.

Da das Standardmodell Fermionen und Bosonen enthält, sind vereinigte Theorien auf der fundamentalsten Ebene anscheinend immer auf eine mit der Poincaré-Gruppe verträgliche Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen, also auf die Supersymmetrie, angewiesen. Eine radikale Alternative wäre dadurch vorstellbar, dass die Welt bei höchsten Energieskalen rein fermionisch ist und Bosonen durch Kondensate beschrieben werden. Ein möglicher Schritt in diese Richtung wurde in [DESY 03-090] mit der rein fermionischen Formulierung einer höherdimensionalen Gravitationstheorie gegangen.

Es gibt starke theoretische Argumente, die für die Existenz von sehr leichten und sehr schwach wechselwirkenden skalaren oder pseudoskalaren Teilchen jenseits

des Standardmodells sprechen. Ein prominentes Beispiel ist das Axion, welches im Rahmen einer natürlichen Lösung des starken CP-Problems als Pseudo-Nambu-Goldstone-Boson einer spontan gebrochenen Symmetrie auftritt, die sich in vereinheitlichte Theorien einbetten lässt. In [DESY 03-057] wurde aufgezeigt, dass sich nach der Außerbetriebnahme von HERA eine einzigartige Chance für die Suche nach solchen Teilchen eröffnet: man könnte die supraleitenden HERA-Dipolmagnete in Laserexperimenten wiederverwenden, welche nach Photonregeneration oder Polarisierungseffekten in starken Magnetfeldern suchen. Dabei könnte eine Sensitivität erreicht werden, welche andere reine Laborexperimente um mehr als drei Größenordnungen übertrifft und selbst astrophysikalische Grenzen in den Schatten stellt.

Stringtheorie

Seit dem 1.1.2003 arbeitet eine neu installierte Gruppe mit Arbeitsgebiet „Stringtheorie und supersymmetrische Quantenfeldtheorien“ am II. Theoretischen Institut der Universität Hamburg. Dabei standen im Berichtszeitraum teilchenphysikalische Aspekte im Vordergrund. Die Berechnung der effektiven Wirkung als Niederenergie-Limes der Stringtheorie ist in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse. Diese effektive Wirkung beinhaltet Skalarfelder mit flachem Potenzial (Moduli), und physikalische Größen wie Massen, Eichkopplungen und Yukawa-Kopplungen hängen von den Vakuumwartungswerten dieser Skalarfelder ab. Generisch ist diese effektive Wirkung singulär, wenn zusätzliche Felder leicht (oder masselos) werden. Es konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Hinzunahme der leichten Felder immer eine nicht-singuläre Wirkung konstruiert werden kann.

Die Berechnung der effektiven Wirkung stand auch im Mittelpunkt der Arbeit [hep-th/0312232]. Hier wurde eine Klasse von Stringmodellen untersucht, in denen die Materiefelder (also das Standardmodell) auf einer D3-Brane lokalisiert sind. Die zehndimensionale Raumzeit der Stringtheorie wurde auf einer sechsdimensionalen Calabi-Yau Mannigfaltigkeit kompaktifiziert und die Kopplungen der Materiefelder an die Moduli der Calabi-Yau Mannigfaltigkeit berechnet. Durch das Anschalten von Hintergrundflüssen kann Supersymmetrie

spontan gebrochen werden. Dadurch war es möglich, die weichen Brechungsterme der Supersymmetrie zu berechnen. Diese Brechungsterme sind von teilchenphysikalischem Interesse, da sie z. B. die Massen der gesuchten supersymmetrischen Teilchen bestimmen.

Supersymmetrische Feldtheorien werden auch unabhängig von der Stringtheorie als mögliche Erweiterungen des Standardmodells betrachtet. Sie beinhalten generisch ein stabiles, schwach wechselwirkendes Teilchen, das als aussichtsreicher Kandidat für dunkle Materie diskutiert wird. Je nach Beschaffenheit dieser WIMPs sind bereits geplante Experimente für deren Nachweis sensitiv [DESY 03-024].

Stark gekoppelte supersymmetrische Feldtheorien werden auch als einfache QCD-artige Modelle untersucht. Wegen der vereinfachten Quanteneigenschaften supersymmetrischer Theorien lassen sich störungstheoretische Aspekte besser kontrollieren. Motiviert durch stringtheoretische Überlegungen hat es auf diesem Gebiet wesentliche Fortschritte gegeben. Es wurde ein Vergleich dieser analytischen Vorhersagen mit den bestehenden numerischen Simulationen auf dem Gitter durchgeführt. Überraschenderweise ergaben sich deutliche Diskrepanzen im Spektrum der Gluebälle, die nicht komplett ausgeräumt werden konnten. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig und wichtig.

Einen Zusammenhang zwischen (supersymmetrischer) QCD und Stringtheorie wird auch im Rahmen der AdS/CFT-Korrespondenz vermutet. Dabei wird nahegelegt, dass im Limes starker Kopplung Quantenfeldtheorien durch Supergravitationstheorien in fünf Raumzeit Dimensionen beschrieben werden. Auf diesem aktiven Arbeitsgebiet hat es im vergangenen Jahr interessante Entwicklungen gegeben, und eine kontrollierte Störungstheorie für eine bestimmte Klasse von Operatoren konnte vorgeschlagen werden. Aspekte der dualen Supergravitationstheorien wurden in [DESY 03-186] erarbeitet.

Quantengravitation

Die allgemein kovariante lokale Formulierung der Quantenfeldtheorie, die in den letzten Jahren in unserer Arbeitsgruppe entwickelt worden ist [DESY 02-

063], wurde auf das äußere Feld-Problem in der Quantenelektrodynamik [DESY-THESIS 04-002] und auf die thermodynamischen Eigenschaften von Zuständen in Robertson-Walker-Raumzeiten angewandt. Erstmals gestattet die neue Methode eine lokale Festlegung der Renormierungsbedingungen und ermöglicht dadurch den Vergleich physikalischer Eigenschaften in verschiedenen Raumzeiten. Im Prinzip erlaubt sie auch eine hintergrundunabhängige Quantisierung der Gravitation, wobei allerdings das Problem der Nichtrenormierbarkeit nicht gelöst wird.

Neben diesen Untersuchungen, bei denen eine kontinuierliche Raumzeit vorausgesetzt wird, wurden die Arbeiten an einer Ausdehnung der Konzepte der Quantenfeldtheorie auf eine nichtkommutative Raumzeit fortgesetzt. Diese Arbeiten sind motiviert durch die Vermutung, dass die Nichtkommutativität der Raumzeitkoordinaten eine approximative Beschreibung von

Quanteneffekten der Gravitation gestattet. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Fragen des geeigneten Lokalisationsbegriffs, der Eichinvarianz, der Renormierbarkeit und der Unitarität [DESY-THESIS-04-004]. Ausgehend von der Überlegung, dass in einer nichtkommutativen Raumzeit Punkte nicht zusammenfallen können, wurde eine ultraviolett-endliche Version einer Quantenfeldtheorie vorgestellt [DESY 03-006].

Ein anderer Ansatz beruht auf der Möglichkeit, auf diskretisierten Raumzeiten nichtkommutative Differentialkalküle einzuführen. Es konnte gezeigt werden, dass Gravitation als eine verallgemeinerte Eichtheorie in einem solchen Rahmen behandelt werden kann, wobei man die Palatini-Wirkung zugrunde legt. Dieser Ansatz, in dem die Forderung der Unitarität der Paralleltransporter aufgegeben wird, wirft ein interessantes neues Licht auf das Auftreten der Higgsfelder [hep-ph/0305331, hep-lat/0305026].