

Bereich Forschung Hochenergiephysik

Inhalt

Übersicht	35
H1 Experiment	39
ZEUS Experiment	55
HERMES Experiment	67
HERA-B Experiment	79
Theoretische Physik	85
Forschung für den International Linear Collider	99
Forschung Linearbeschleuniger-Technologien	117

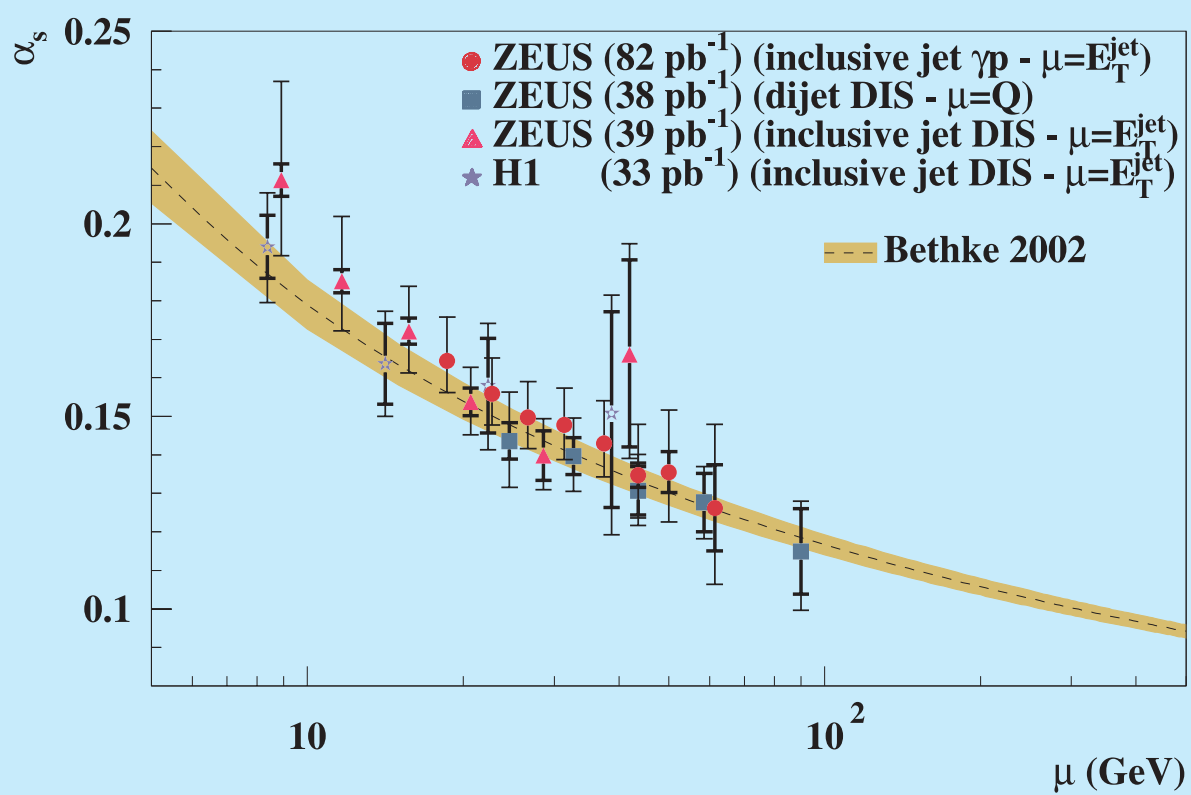


Abbildung 2: Abnahme der starken Kopplungskonstanten α_s mit zunehmender Energie gemessen von H1 und ZEUS in verschiedenen Analysen.

Übersicht Forschung Hochenergiephysik

Im Berichtsjahr fanden eine Anzahl von Ereignissen statt, die für die mittel- und längerfristige Entwicklung der Teilchenphysik weltweit, in Deutschland und am DESY von maßgeblicher Bedeutung sind.

Mit der Vergabe des Nobelpreises der Physik an D. Gross, D. Politzer und F. Wilczek für die Entdeckung der asymptotischen Freiheit wurde auch die Bedeutung des Studiums der starken Wechselwirkung gewürdigt. DESY hat mit der Entdeckung der Gluonen bei PETRA, den Präzisionsmessungen der starken Kopplungskonstanten bei PETRA und HERA, sowie den detaillierten Ergebnissen zur Protonstruktur und zur QCD-Strahlung bei HERA ganz wesentlich zu diesem bei weitem noch nicht abgeschlossenen Forschungsgebiet experimentell und theoretisch wesentliche Beiträge geliefert. So konnte zum Beispiel die Energieabhängigkeit der starken Kopplungskonstanten α_s in einem großen Energiebereich von H1 und ZEUS bestimmt und mit der theoretischen Vorhersage verglichen werden (siehe Abb. 2).

Dank besonderer Anstrengungen der HERA Maschinengruppe und der Mitarbeiter der HERA Experimente gelang es im Berichtsjahr die HERA II Designwerte zu erreichen und den Untergrund so zu reduzieren, dass alle drei HERA Experimente mit hoher Effizienz Daten nehmen konnten. Dadurch wurde mit 92 pb^{-1} die bisher höchste integrierte Luminosität pro Jahr erreicht. Neu bei HERA II ist die Polarisation der Positronen für die Kolliderexperimente H1 und ZEUS, die 2004 im Mittel 40% betrug. Bereits zu den Sommerkonferenzen konnten die ersten Ergebnisse, wie z. B. die Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung bei höchsten Impulsüberträgen, vorgestellt werden. Im Herbst 2004 wurde HERA erfolgreich auf den Betrieb mit Elektronen umgestellt. Dies geschah erfreulich schnell und problemlos, mit einer Luminosität ähnlich wie beim Betrieb mit Positronen. Damit wird es möglich sein im Sommer 2005 über die de-

taillierte Planung des Betriebs bis zum Abschalten von HERA Mitte 2007 zu entscheiden. Inzwischen haben die HERA Experimenten die Analyse der in den Jahren 1992–2000 genommenen Daten weitgehend abgeschlossen und veröffentlicht. Auch weiterhin zählen die Ergebnisse der HERA Experimente zu den meist zitierten Publikationen der experimentellen Hochenergiephysik.

Im März begann der Workshop „HERA and the LHC“ mit einem Auftakt Meeting bei CERN (Genf), der im Frühjahr 2005 zu Ende gehen soll. Ziel dieses Workshops ist es, die Verbindung der Physik bei HERA und dem LHC zu untersuchen und zu vertiefen. In einer Reihe von Arbeitstreffen wurde immer wieder die große Bedeutung der Physik und der Messungen der HERA Experimente betont, insbesondere im Hinblick auf das Physik Program bei LHC. Gerade das Verständnis und die Messung der Partonverteilungen im Proton ist von ganz besonderer Bedeutung.

Die Verbindung der Physik bei HERA und LHC zeigt die Stärke und den Erfolg des gesamten HERA Programs. Es ist offensichtlich, dass HERA das einzige Instrument weltweit ist, wo viele der grundsätzlichen Fragen überhaupt untersucht und beantwortet werden können.

In enger Zusammenarbeit mit den DESY IT-Gruppen gelang den HERA Experimenten ein großer Fortschritt bei dem Einsatz von „Grid“-Werkzeugen bei der Datenanalyse: so hat z. B. das ZEUS Experiment einen Großteil der simulierten Daten weltweit verteilt erzeugt.

Im Betriebsjahr gab es wichtige Meilensteine für das IceCube Experiment, das das Eis der Antarktis als 1 km^3 großen Detektor zur Suche nach hochenergetischen Neutrinos aus dem Kosmos verwenden wird: die internationale Finanzierung ist nun sichergestellt, und die Vorbereitungen für das Versenken der Photodetektoren im Eis konnte abgeschlossen werden, so dass Anfang



Abbildung 3: Das ITRP hat in 2004 die von der TESLA Kollaboration entwickelte supraleitende Technologie für den ILC empfohlen.

2005 der erste Tross von Photoröhren erfolgreich versenkt, und die ersten Neutrinoereignisse nachgewiesen wurden. Wesentliche Komponenten wurden dazu von DESY, Standort Zeuthen, geliefert.

Dieses Berichtsjahr war auch ein sehr wichtiges Jahr für den International Linear Collider (ILC). Im Januar haben die Wissenschaftsminister der OECD Mitgliedsstaaten das wissenschaftliche Potenzial und die Roadmap des ILC zustimmend zur Kenntnis genommen. Die internationale Gemeinschaft der Teilchenphysiker hatte Ende 2003 das ITRP (International Technology Recommendation Panel, siehe Abb. 3) unter der Leitung von B. Barish (CALTECH) beauftragt, bis Ende 2004 eine Empfehlung zur Beschleunigertechnologie für den ILC zu geben. Im April 2004 besuchte das ITRP Hamburg, um die supraleitende Technologie, die seit 1992 von der TESLA Kollaboration entwickelt wurde, zu begutachten. Bereits im August 2004 hat das ITRP

bei der Internationalen Konferenz für Hochenergiephysik (ICHEP 2004) in Peking die Empfehlung für die TESLA Technologie ausgesprochen. Die Empfehlung wurde dann einstimmig von ICFA (International Committee for Future Accelerators), in dem auch die Direktoren der großen Beschleunigerlabors vertreten sind, angenommen. Diese Entscheidung ist ein großer Erfolg für die Gemeinschaft der Teilchenphysiker, aber auch für DESY und die TESLA Kollaboration. Mit dieser Entscheidung ergibt sich eine große Synergie mit dem Europäischen Röntgenlaser XFEL am DESY, dessen Beschleuniger ebenfalls die supraleitende Technologie verwendet.

Im November 2004 wurde bei DESY die Projektgruppe ILC (International Linear Collider) gegründet, die alle ILC Aktivitäten bei DESY koordiniert, von den Beschleunigerarbeiten über Detektorentwicklung bis hin zu Physikstudien.

Unter der Federführung DESY's wurde im März 2004 von einem Konsortium von mehr als zwanzig europäischen Labors der EUROTeV Vorschlag bei der Europäischen Union eingereicht. Ziel ist es, die für einen Linear Collider notwendigen Technologien, mit Ausnahme der Beschleunigungstechnologie, die bereits im Rahmen des EU Projekts CARE gefördert wird, in europäischer Zusammenarbeit weiter zu entwickeln. Unter mehr als hundert Vorschlägen wurde EUROTeV, gemeinsam mit dem ebenfalls unter Federführung DESY's vorgelegten Vorschlag EUROFEL von den Gutachtern auf die ersten beiden Plätze gesetzt.

Anfang 2004 fand die Evaluation des Programms des HGF Forschungsbereichs „Struktur der Materie“ für die Zeit 2005 bis 2009 statt. Der DESY Bereich „Forschung Hochenergiephysik“ ist in den beiden Forschungsprogrammen „Elementarteilchenphysik“ und „Astroteilchenphysik“ maßgeblich beteiligt. Das von DESY vorgelegte Programm wurde weitgehend exzellent und mit den höchsten Noten beurteilt. Das Basisprogramm wurde wie vorgeschlagen genehmigt. Trotz der ausgezeichneten Beurteilung konnten wegen der begrenzten Ressourcen zusätzliche Mittel im Rahmen so genannter Überzeichnungen nur für zwei Themen, „HERA“ und „Vorbereitungen für Linearbeschleuniger“ eingeworben werden.

Öffentlichkeitsarbeit und spezielle Angebote für Schüler (physik.begreifen@desy.de und

faszination.physik@desy.de) sowie Studenten (Sommerstudentenprogramm) besitzen einen hohen Stellenwert bei DESY und im Bereich Forschung Hochenergiephysik. Dies soll am Beispiel der Schülerlabors physik.begreifen in Hamburg und Zeuthen verdeutlicht werden. Beide haben sich zu einem wichtigen und äußerst gefragten Instrument entwickelt, um Schüler an die Naturwissenschaften, insbesondere die Physik heranzuführen und zu begeistern. Die Statistik im Berichtsjahr spricht für sich: in Hamburg wurden 200 Gruppen mit insgesamt 4180 Schülern in den Bereichen Vakuum und Radioaktivität betreut, in Zeuthen seit der Eröffnung im Mai 61 Gruppen mit 1300 Schülern im Bereich Vakuum.

Im Berichtsjahr wurden im Bereich Forschung Hochenergiephysik die Berufungsverhandlungen mit zwei Leitenden Wissenschaftlern erfolgreich abgeschlossen: Am 1.1.2005 tritt Herr J. Mnich die Nachfolge von G. Wolf (Experimentelle Teilchenphysik) und im Mai 2005 Herr V. Schomerus die Nachfolge von M. Lüscher (Theoretische Teilchenphysik) an. 2004 gingen die Leitenden Wissenschaftler D. Haidt und F. Jägerlehner in den Ruhestand und A. Stahl wurde auf eine C4-Professur an die RWTH-Aachen berufen. Die Amtszeit von R. Klanner als Mitglied des DESY Direktoriums und Leiter des Bereichs Forschung Hochenergiephysik ging Ende November 2004 zu Ende. Seine Nachfolge trat am 1.12.2004 R.-D. Heuer von der Universität Hamburg an.

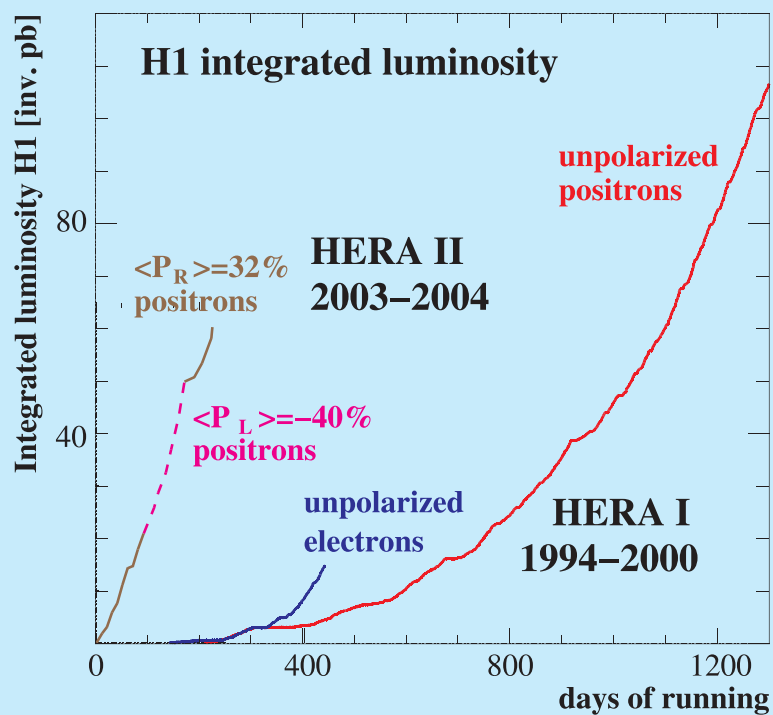


Abbildung 4: Die von H1 aufgezeichnete Luminosität als Funktion der Anzahl der Messtage, getrennt für die HERA I Periode (1994–2000), sowie für den Anfang der HERA II Periode (2003–2004). Die bis jetzt erreichte mittlere longitudinale Polarisierung des Positronstrahles in der HERA II Periode beträgt 32% und –40% für rechts- bzw. linkshändige Polarisierung.

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 Hamburg, Univ. Hamburg, Univ. und MPI Kernphys. Heidelberg, Univ. Kiel, Slovak Acad. Sci. Košice, Univ. of Lancaster, Univ. of Liverpool, QMWC London, Univ. of Lund, Univ. of Manchester, Univ. Marseille, CINVESTAV Merida und Mexico, ITEP und Lebedev Inst. Moscow, MPI Phys. München, Univ. de Paris-Sud Orsay, Ec. Polytech. Palaiseau, Univ. Paris VI und VII, Univ. of Montenegro Podgorica, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Inst. for Nucl. Research and Nucl. Energy Sofia, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: M. Klein, DESY

Ende 2003 wurde mit der Realisierung des HERA II Programmes begonnen, nachdem in den vorangegangenen Jahren zunächst schwierige Strahluntergrundprobleme zu bewältigen waren. Bis zum August 2004 lief HERA mit Positronen und Protonen, wobei das H1-Experiment etwas mehr Luminosität registrieren konnte als im bisher erfolgreichsten Jahr 2000. Im Herbst 2004 wurde der Beschleuniger auf den Betrieb mit Elektronen umgestellt.

Im Unterschied zur ersten Phase von HERA werden jetzt Kollisionen von polarisierten Leptonen mit Protonen aufgezeichnet. Durch den Sokolov-Ternov-Effekt werden im Speicherring die Positronen oder Elektronen transversal polarisiert. Durch Rotation der Spinorientierung an den ep-Wechselwirkungspunkten wird der Spin longitudinal ausgerichtet und ermöglicht damit Tests der schwachen Wechselwirkung. Erstmals konnte somit die Polarisationsabhängigkeit des Streuquerschnitts der geladenen Stromwechselwirkung gemessen werden. Die entsprechenden Daten wurden auf der ICHEP, der internationalen Konferenz für Hochenergiephysik, im August 2004 in Beijing vorgestellt.

Unter Verwendung aller in den letzten 10 Jahren aufgezeichneten Daten des H1-Experiments wurden,

ebenfalls zur ICHEP-Konferenz, die Analysen von Ereignissen mit isoliert auftretenden Leptonen und großem fehlenden Transversalimpuls präsentiert, deren Häufigkeit die Erwartung des Standardmodells übertrifft. Mit einer bis August integrierten Luminosität von 171 pb^{-1} wurden 10 Ereignisse nachgewiesen, bei denen das isolierte Lepton ein Elektron oder Positron ist, wohingegen nur 2.7 Ereignisse erwartet werden. Im Myonkanal stehen 6 gemessene Ereignissen mit isoliertem Myon einer Erwartung des Standardmodells von 2.6 gegenüber. Bei der Suche nach Ereignissen mit isolierten Taus wurde kein Kandidat gefunden. Beide Analysen, die der „Charged Current Events“ sowie die der „Isolated Leptons“, konnten nahezu Online durchgeführt werden, unter Benutzung neuentwickelter H1 Software im „Object Oriented“ Standard, sowie der parallel zur Datennahme erfolgenden Kalibrationen des Detektors.

Der H1-Detektor konnte im Jahre 2004 zuverlässig betrieben werden. Wesentliche Elemente des Experiments wurden weiterentwickelt, so die auf den Signalen der Drift- und Proportionalkammern basierenden Spurtrigger, der „Jet“-Kalorimetertrigger, das zentrale System der Datenaufnahme, die Rechnerleistung und Analysesoftware, die Protonspektrometer im Vorwärtsbereich und andere.

Die Kollaboration reichte 45 wissenschaftliche Arbeiten bei der ICHEP Konferenz ein, von denen 13 in diesem Jahr publiziert wurden. Wie im Folgenden ausgeführt, setzt die H1-Kollaboration damit die Suche nach neuer Physik bei höchsten Energien, sowie die Analyse der Protonstruktur und der starken Wechselwirkung fort. Herausragende Resultate waren die erste Messung der Dichte der Beauty-Quarks im Proton, die vollständige Analyse der Erzeugung von Lepton- und Jetsignaturen bei hohen Transversalimpulsen im Vergleich mit dem Standardmodell und der Nachweis eines möglicherweise aus 5 Quarks bestehenden gebundenen D^*p Zustands. Wie in Beijing hervorgehoben wurde, sind die HERA-Analysen von entscheidender Bedeutung für die Weiterentwicklung der QCD, so auf dem Gebiet der Partonkorrelationen, verallgemeinerter und unintegrierter Partondichten oder der Diffraktion.

Physiker der H1-Kollaboration nahmen mit wissenschaftlichen und organisatorischen Arbeiten an der Durchführung des HERA-LHC Physik Workshops teil. In mehreren Treffen von Mitgliedern von HERA- und LHC-Experimenten mit theoretischen Physikern wurde in fünf großen Arbeitsgruppen die Bedeutung der HERA-Resultate für die Physik am LHC herausgearbeitet. Die Ergebnisse des Workshops werden im Jahr 2005 vorliegen.

Die H1-Kollaboration nahm mit Physikern aus dem Institut für Kernforschung und Kernenergie der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften, Sofia, sowie der Universität Podgorica (Montenegro) zwei weitere Gruppen als Mitglieder auf. Sie besteht damit jetzt aus 41 Instituten aus insgesamt 15 Ländern.

Der H1-Detektor

Datennahme

Der Datennahme-Betrieb wurde zum Jahreswechsel ohne jegliche Unterbrechung fortgesetzt. Die Vakuumbedingungen im Bereich der H1-Wechselwirkungszone verbesserten sich im Laufe des Jahres stetig, so dass die parallel erfolgende kontinuierliche Erhöhung der HERA-Strahlströme nicht mehr zu unakzeptabel hohem Untergrund im H1-Detektor führte. Ab Mitte Fe-

bruar 2004 stellten die Untergrundverhältnisse im H1-Detektor keine Beschränkung mehr für die Strahlintensität dar und Anfang Juni erreichte die Datennahmeeffizienz für Betrieb mit eingeschalteter Hochspannung sogar wieder Werte von mehr als 85%, die zuvor nur im Jahr 2000 erreicht worden waren. Ab Mitte Juni verschlechterten Probleme mit dem HERA-Vakuumsystem auf der rechten Seite von H1 die Datennahmebedingungen allerdings wieder erheblich. Zunächst trat erneut ein Vakuumleck an einer der kritischsten Stellen von H1 auf, 11 m vor dem Wechselwirkungspunkt. An dieser Stelle treffen drei verschiedene Strahlrohre an einem Absorber für die Synchrotronstrahlung auf engstem Raum zusammen. Die Flanschdichtung des Protonstrahlrohres hatte den hohen thermischen und mechanischen Belastungen nicht standgehalten und musste ausgetauscht werden. Durch die damit verbundene Belüftung des Strahlrohres verschlechterten sich die Vakuumbedingungen wieder. Ein zusätzliches Problem trat kurze Zeit später durch die infolge von Überhitzung entstandene lokale Verformung des Elektronstrahlrohres um einige mm in einem Abstand von 6 m vor H1 auf. Um Gasausbrüche im Vakuum und damit verbundene Strahlverluste zu vermeiden, wurde der verfügbare Parameterraum für den HERA Betrieb stark eingeschränkt.

Trotz dieser Schwierigkeiten war die Datennahme im Positron-Proton Betrieb sehr erfolgreich. H1 konnte insgesamt die Rekordluminosität von 84 pb^{-1} aufzeichnen, von der 57 pb^{-1} mit voll eingeschalteter Hochspannung genommen wurden. Während des Betriebs wurde zweimal die Richtung der longitudinalen Positron-Polarisation gewechselt, so dass je etwa gleichviel Daten mit beiden Polarisationszuständen, mit einer mittleren Polarisation von +32% bzw. -40%, vorhanden sind. Eine vorläufige Analyse dieser Daten ermöglichte die erste Messung der Polarisationsabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts der geladenen schwachen Wechselwirkung.

In der von Mitte August bis Mitte Oktober dauernden Betriebsunterbrechung von HERA konnten defekte Komponenten des Vakuumsystems ausgetauscht und verbesserte technische Lösungen realisiert werden. So verhindert ein Einsatz im oben erwähnten neu eingebauten Absorber, dass das dahinter liegende Strahlrohr von direkter Synchrotronstrahlung getroffen wird. Schweißverbindungen anstelle von geschraubten

Flanschverbindungen sorgen nun ebenfalls für eine erhöhte Betriebssicherheit. Eine verbesserte Instrumentierung mit Temperatursensoren soll zukünftig eine Überhitzung des ausgetauschten Elektronstrahlrohres verhindern.

Die anschließende Umstellung von HERA auf Elektron-Proton-Betrieb machte eine Verschiebung mehrerer HERA-Magnete und des H1-Detektors erforderlich. Obwohl die Strahlströme mit Rücksicht auf die nach den Umbauten des Vakuumsystems anfänglich schlechten Vakuumbedingungen zunächst reduziert waren, gelang es rasch, den Luminositätsbetrieb wiederaufzunehmen, wobei Rekordwerte für die spezifische Luminosität erreicht wurden.

Reparaturen und Erweiterungen

Durch ein im Mai aufgetretenes Leck an einer schadhafte Verbindung im Wasserkühlkreis für den Vorwärts-Siliziumdetektor (FST) wurde ein großer Teil der FST-Sensoren und der Ausleseelektronik so stark beschädigt, dass dieser Detektor nicht mehr betrieben werden konnte. Die genaue Inspektion nach dem Ausbau der Siliziumdetektoren ergab, dass für eine erfolgreiche Reparatur eine Neubeschaffung aller Sensoren und ein Neubau der Frontendelektronik notwendig waren. Da die noch zu erwartende integrierte Strahlenbelastung in der verbleibenden Laufzeit von HERA nahe an die tolerierbare Grenze des bisher verwendeten Auslesechips reicht, wurde beschlossen, den Chip in strahlenresistente Technologie zu übertragen und neu zu bauen. Darüberhinaus zeigte sich, dass eine Überarbeitung des gesamten Kühlkreislaufs auch im Falle des gleichzeitig ausgebauten Rückwärts-Siliziumdetektors (BST) notwendig war. Da diese sehr aufwändigen Reparaturarbeiten nicht vor Beendigung der HERA Betriebsunterbrechung fertiggestellt werden konnten, werden FST und BST erst im Sommer 2005 wieder eingebaut. Die Funktion des BST als Strahlungsmonitor wird mit einem neuen segmentierten Szintillator erfüllt, der anstelle des BST hinter dem zentralen Siliziumdetektor (CST) installiert wurde. Die Zugangsmöglichkeit zum H1-Detektor im Sommer 2004 wurde auch genutzt, um Reparaturen am CST vorzunehmen, der zuvor wegen eines Kurzschlusses an der Frontendelektronik nur zu 75% aktiv war. Ebenso konnten eine Anzahl fehlerhafter Frontendkarten der inneren Proportionalkam-

mer (CIP) ersetzt werden, so dass der für die effiziente Datennahme wichtige CIP-Trigger wieder mit erhöhter Redundanz betrieben werden kann. Ein wichtiger Schritt war auch die erfolgreiche Inbetriebnahme der ersten von insgesamt drei Triggerstufen des neuen „Fast Track Triggers“ (FTT), der es zukünftig erlauben wird, exklusive Endzustände mit geladenen Teilchen Online zu selektieren. Das im Zuge der Installation des neuen Vorwärtsspektrometers (VFPS, bei 220 m in Protonstrahlrichtung) entwickelte hochpräzise System für die kontrollierte Führung der Faserdetektoren an den Protonstrahl, wurde auch in die Stationen des existierenden FPS-System eingebaut und erlaubt einen zuverlässigeren Betrieb dieser Detektoren, die für die diffraktive Physik von großer Bedeutung sind. Mit großem Erfolg konnte nach der HERA-Betriebspause der existierende optische Faser-Ring für die zentrale Datenakquisition, durch ein auf VME PCs und Fast Ethernet basierendes System ersetzt werden. Damit wurden Zuverlässigkeit und Wartungsmöglichkeit dieser wesentlichen Komponente deutlich verbessert.

Physikalische Ergebnisse

Die Auswertung der zahlreichen Messdaten von HERA I wurde fortgesetzt, was zu einer gegenüber 2003 deutlich erhöhten Anzahl von Publikationen führte. Im Folgenden werden wichtige, im Berichtsjahr abgeschlossene Analysen etwas näher erläutert.

QCD und Protonstruktur

Die Erforschung der Protonstruktur und die kritische Überprüfung der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, ist eine der Hauptaufgaben der HERA-Physik.

In zwei Veröffentlichungen wurden exklusive Endzustände ausgewählt, in welchen ein energetisches Photon bzw. ein energetisches neutrales π -Meson (π^0) nachgewiesen wurde, um die Gültigkeit der QCD in speziellen Bereichen des Phasenraums zu prüfen. Außerdem wurde in einer Veröffentlichung die Strukturfunktion des Protons bei sehr niedrigen Viererimpulsüberträgen (Q^2) mit Hilfe sogenannter QED Compton-Ereignisse bestimmt.

Bei der tiefunelastischen Elektron-Proton-Streuung wird ein Eichboson (dominant ein virtuelles Photon) zwischen dem Elektron und dem Proton ausgetauscht, wobei der Viererimpulsübertrag Q^2 ein Maß für die Auflösung ist, mit welcher die Protonstruktur untersucht wird. Das ausgetauschte Eichboson streut an einem Quark oder Gluon (so genannte Partonen) im Proton. Die Protonstruktur wird dann durch Strukturfunktionen beschrieben, die von der Variablen x abhängen, dem Anteil des Protonimpulses, der von dem wechselwirkenden Parton getragen wird. Im größten Teil des Phasenraums bei HERA ist der Streuquerschnitt proportional zu der Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$. Die HERA-Experimente H1 und ZEUS haben in mehreren früheren Veröffentlichungen gezeigt, dass die gemessene Funktion F_2 über einen großen Bereich der Variablen x und Q^2 sehr gut von der QCD beschrieben werden kann. Bei kleinen Werten von $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ kann jedoch die QCD in Störungsrechnung nicht angewendet werden; hier werden stattdessen phänomenologische Modelle zur Beschreibung angesetzt, insbesondere solche, die auf der Regge-Theorie basieren. Besonderes Interesse gilt daher dem Übergangsbereich von perturbativer QCD zur niederenergetischen Phänomenologie.

Messungen bei kleinen Impulsüberträgen erfordern spezielle Experimentiertechniken, weil das gestreute Elektron häufig den Detektor unter sehr kleinen Streuwinkeln verlässt, ohne nachgewiesen zu werden. In der erwähnten Veröffentlichung wurde ausgenutzt, dass in einem kleinen Teil dieser Streuprozesse das Elektron schon vor der Kollision mit dem Parton ein so genanntes QED-Compton-Photon abstrahlt. Auf diese Weise erhält das Elektron einen Transversalimpuls und kann daher selbst bei kleinen Werten von Q^2 in das rückwärtige Kalorimeter gestreut werden. Durch Nachweis sowohl des Photons als auch des Elektrons wird die Ereigniskinematik der QEDC-Prozesse rekonstruiert.

Der x -Bereich wurde zu großen Werten hin erweitert, als Folge der QEDC-Kinematik sowie auch durch eine verbesserte Rekonstruktion des hadronischen Endzustandes, der aus dem gestreuten Parton hervorgeht. Hierdurch wurde eine x -Region erreicht, in der sonst nur Daten aus älteren, so genannten „Fixed Target“ Experimenten vorliegen, was einen direkten Vergleich mit diesen ermöglicht. Abbildung 5 zeigt die Strukturfunktion F_2 , aufgetragen gegen x , für drei Werte von Q^2 .

Die neuen Messungen von H1 stimmen gut mit den früheren Experimenten (E665, NMC, SLAC) überein.

Um die Emission von hochenergetischen Photonen geht es auch in einer anderen Veröffentlichung, wobei die Photonen hier vom hadronischen System abgestrahlt werden. In diesen Ereignissen, die einen sehr kleinen Teil der totalen Wechselwirkungsrate ausmachen, werden die Photonen „prompt“ genannt. Sowohl das Photon als auch das hadronische System werden im Flüssig-Argon Kalorimeter nachgewiesen. Dabei ist wichtig, dass die Photonen, dank der hohen Granularität des Kalorimeters, aufgrund ihres besonders engen Schauerprofils vom Untergrund statistisch gut getrennt werden können. So konnten Wirkungsquerschnitte als Funktion von sowohl der transversalen Energie als auch der Pseudorapidität des Photons gemessen werden, wobei die Pseudorapidität ein Maß für den Streuwinkel bezüglich der Strahlrichtung ist. In Abbildung 6 werden die gemessenen Wirkungsquerschnitte mit mehreren Störungsrechnungen der QCD verglichen, sowohl in führender (LO) als auch in nächst-führender Ordnung (NLO) der starken Kopplungskonstanten α_s . Man sieht, dass die Vorhersagen dieser Rechnungen mindestens 30% unter den Daten liegen. Die Diskrepanz zwischen Daten und Theorie wurde auch untersucht, wenn zusätzlich zum prompten Photon ein hadronischer „Jet“ verlangt wird. Ein „Jet“ entspricht einem energetischen Parton, das im Kollisionsprozess in ein enges Bündel von Hadronen fragmentiert. Wirkungsquerschnitte, gewonnen für Ereignisse mit promptem Photon und einem hadronischen Jet, sind ebenfalls in Abbildung 6 gezeigt und mit den Rechnungen der QCD verglichen. Die Übereinstimmung zwischen Daten und Vorhersagen der Rechnungen ist hier besser, obwohl die Daten immer noch etwas über den Vorhersagen liegen. Da in diesem Fall die so genannten hadronischen Korrekturen kleiner sind als im Falle der inklusiven prompten Photonen, kann man vermuten, dass die Diskrepanzen im inklusiven Fall auf den noch nicht berechneten höheren Ordnungen jenseits von NLO beruhen.

In einer weiteren Veröffentlichung wurden Endzustände mit einem energetischen neutralen π -Meson (π^0) untersucht. Da das π^0 in zwei Photonen zerfällt, kann es im Flüssig-Argon Kalorimeter nachgewiesen und aufgrund des breiteren Schauerprofils statistisch gut von den prompten Photonen (siehe oben) getrennt werden. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf den Pha-

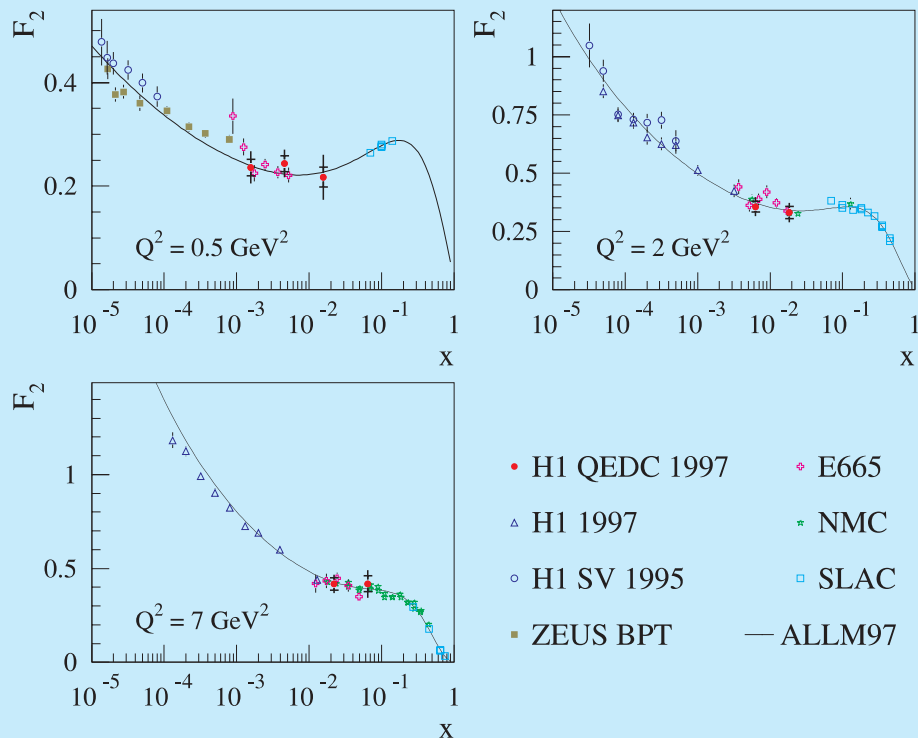
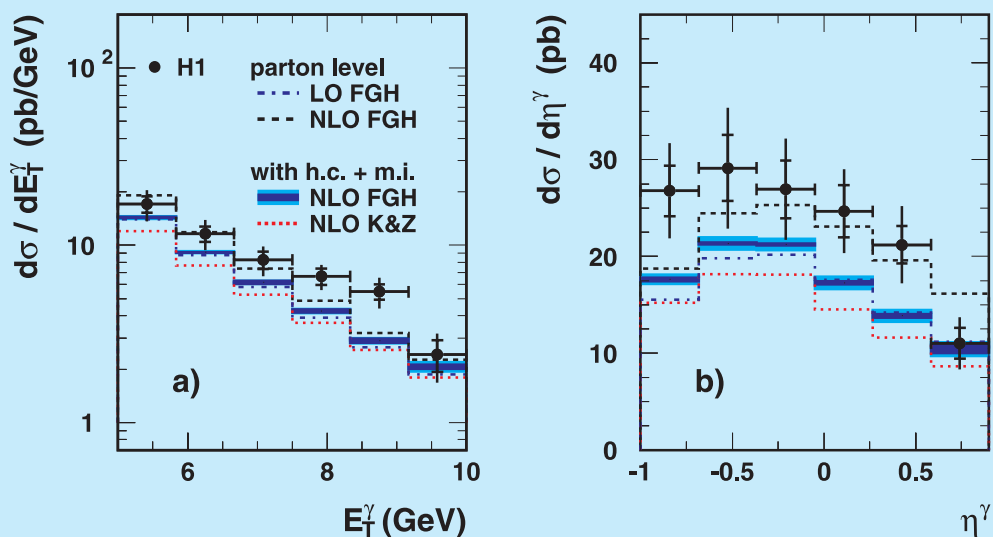


Abbildung 5: Messungen der Proton Strukturfunktion F_2 mit Hilfe von QED Compton-Ereignissen („H1 QEDC“) verglichen mit früheren Messungen bei HERA sowie mit Messungen aus „Fixed Target“ Experimenten. Die durchgezogene Kurve zeigt eine Parameterisierung der Strukturfunktion, die auf einer Verbindung der Regge-Theorie mit perturbativer QCD basiert.

senraumbereich nahe an der Richtung des ausgehenden Protons, die als „Vorwärts“-Richtung bezeichnet wird. Aufgrund des hohen Transversalimpulses des π^0 können hier Störungsrechnungen in der QCD vorgenommen werden. Interessant ist dabei, dass es im Bereich der Vorwärtsrichtung bei kleinen Werten von x noch keine eindeutige theoretische Beschreibung gibt, und dieser daher als Testbereich für verschiedene Ansätze der Rechnungen dienen kann. In einer früheren Studie (siehe Jahresbericht 1999) konnte schon gezeigt werden, dass die so genannte DGLAP-Approximation der Parton-Kaskade, die sonst in einem sehr großen Bereich von Q^2 und x die Daten gut beschreibt, hier deut-

lich unter den Daten liegt. Allerdings gab es damals nur Rechnungen in führender Ordnung. In der vorliegenden Studie konnte die Daten-Statistik verdreifacht und Wirkungsquerschnitte als Funktion von mehreren Variablen, z. B. des Transversalimpulses und der Pseudorapidität des π^0 , gemessen werden. Auch wurde jetzt zum erstenmal die Energieverteilung des übrigen hadronischen Systems neben dem π^0 bestimmt. Die Vergleiche mit neueren QCD-Rechnungen, nun auch in nächstführender Ordnung, zeigen im Allgemeinen gute Übereinstimmung mit den Daten, ausgenommen für solche Modelle, die das ausgetauschte virtuelle Photon als strukturlos behandeln.

Inclusive prompt photon



Prompt photon + jet

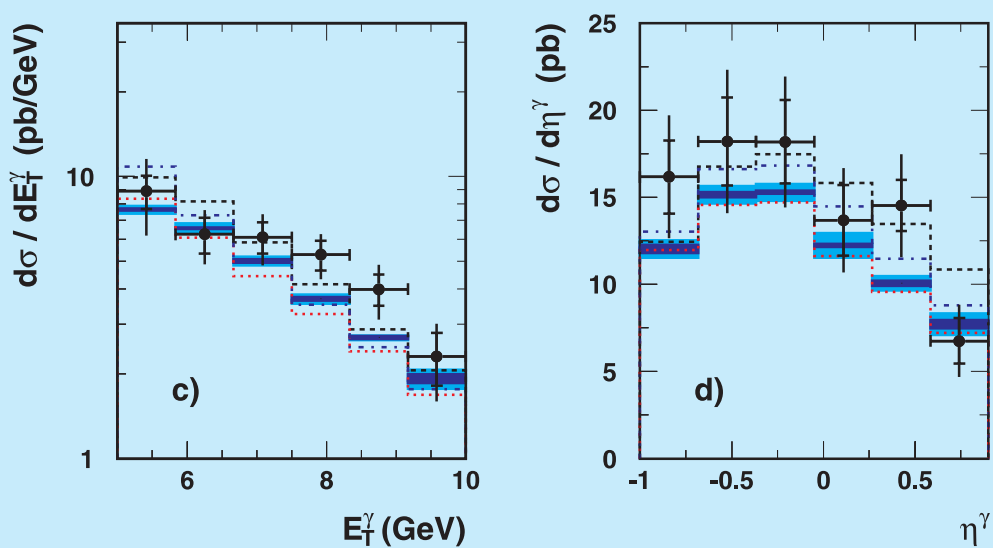


Abbildung 6: Wirkungsquerschnitte der Erzeugung von direkten Photonen in ep -Kollisionen als Funktion der Transversalenergie und der Pseudorapidität des Photons (a,b). In (c,d) sind die entsprechenden Wirkungsquerschnitte aufgetragen, wenn zusätzlich zum direkt erzeugten Photon noch ein hadronischer Jet verlangt wird. QCD-Rechnungen in führender (LO) und nächst-führender (NLO) Ordnung sind mit den Daten verglichen.

Produktion von 2-Jet Ereignissen mit assoziiertem, führendem Neutron

Etwa 10% der Ereignisse in der tief-unelastischen ep-Streuung sind diffraktiver Natur. Bei solchen Ereignissen verliert das Proton nur wenig an Energie und bleibt entweder „intakt“ oder „dissoziiert“ in ein System mit einer Masse von einigen GeV. Bleiben zudem die Quantenzahlen unverändert, spricht man von „Pomeron“-Austausch. Diese Klasse von Ereignissen wurde bereits in vielen Studien bei HERA untersucht.

In einem Teil der Ereignisse gibt das Proton aber seine elektrische Ladung ab und verwandelt sich in ein Neutron, das in einem speziellen Kalorimeter nachgewiesen wird, welches sich in Protonrichtung, etwa 100 m vom Hauptdetektor entfernt, befindet. Das vom Proton ausgetauschte System trägt nun positive elektrische Ladung und man spricht von „Reggeon“-Austausch. Der wahrscheinlichste Kandidat hierfür ist ein geladenes Pion, und Modelle, die auf Pion-Austausch (OPE, One Pion Exchange) basieren, konnten in früheren Studien erfolgreich zur Beschreibung dieser Reaktionen eingesetzt werden.

In einer Veröffentlichung wurden im Berichtsjahr solche Neutron-Ereignisse eingehender studiert, wobei verlangt wurde, dass das hadronische System im Hauptdetektor zwei energetische Jets aufweist, so genannte Dijet-Ereignisse. Die Energie der Jets dient als Skala für den harten Streuprozess in den QCD-Rechnungen. Ereignisse, sowohl aus Photoproduktion als auch aus tief-unelastischer Streuung, wurden selektiert und Wirkungsquerschnitte als Funktion von Q^2 , von Transversalenergie und Pseudorapidität der Jets, als auch von anderen kinematischen Variablen gemessen.

Vergleiche von verschiedenen QCD-Rechnungen mit den Daten bestätigen die früheren Resultate, nämlich dass auf Pion-Austausch basierende Modelle die Daten gut beschreiben. Dagegen liefern Modelle, die diesen Pion-Austausch nicht beinhalten, im Allgemeinen eine schlechtere Beschreibung. Zum erstenmal konnten auch QCD-Rechnungen in nächst-führender Ordnung (NLO) zum Vergleich herangezogen werden. Abbildung 7 zeigt, dass diese Rechnungen die Daten recht gut beschreiben.

Des Weiteren wurden die Dijet-Daten mit führendem Neutron mit inklusiven Dijet-Daten verglichen. Da-

bei sollte das Verhältnis zwischen den jeweiligen Wirkungsquerschnitten unabhängig von den kinematischen Variablen bleiben, wenn der grundlegende Mechanismus für die Jetproduktion in beiden Fällen der gleiche ist. Die Daten unterstützen im Allgemeinen diese Hypothese, mit einigen Ausnahmen. So steigt z. B. das Verhältnis mit zunehmendem Impulsanteil, mit dem das ausgetauschte virtuelle Photon an der Kollision teilnimmt, an. Dies kann so interpretiert werden, dass bei Neutron-assoziiertem Dijet-Produktion der Beitrag von Photonen, die vor der harten Streuung nicht in ein hadronisches System fluktuieren, sondern direkt an der Wechselwirkung teilnehmen, eine größere Rolle spielt als im inklusiven Fall.

Physik schwerer Quarks

Erzeugung und Zerfall schwerer Quarks (Charm c und Beauty b) in unelastischer ep-Streuung bei HERA-Energien sind von herausragendem Interesse zur Erforschung der Protonstruktur sowie der Quantenchromodynamik. Der dominante Mechanismus der Erzeugung schwerer Quarks führt über die Fusion des virtuellen Photons mit einem Gluon aus dem Proton zur Bildung eines Paares schwerer Quarks, d. h. $\gamma^*g \rightarrow c\bar{c}$ oder $b\bar{b}$. Die schweren Quarks bilden häufig mit leichteren Quarks Charm- oder Beauty-Hadronen, d. h. Mesonen oder Baryonen, die eine endliche Lebensdauer haben, welche einer Zerfallslänge von 100–500 μm entspricht und folglich im zentralen Siliziumdetektor (CST) von H1 nachweisbar ist. In Abhängigkeit von der Größe des durch das Photon übertragenen Viererimpulses, Q^2 , kann man die schweren Quarks als dem Proton zugehörig oder, bei kleinen Q^2 , als außerhalb des Protons erzeugt betrachten. Die erhöhte Luminosität sowie die Siliziumdetektortechnik erlauben es, die Untersuchung schwerer Quarks mit dem H1-Experiment wesentlich weiterzuentwickeln. Dieser Thematik dienten, mit unterschiedlichem Fokus, drei Publikationen, die zu den herausragenden Arbeiten der Charm- und Beauty-Physik bei HERA zählen.

Die klassische Methode zum Nachweis von Charm-Teilchen bei HERA besteht in der Rekonstruktion des D^* -Mesons, das über den Zwischenzustand eines neutralen D^0 -Mesons in die Endzustandsteilchen $K\pi\pi$ zerfällt. Da die Massen von D^* und D^0 nahezu gleich sind,

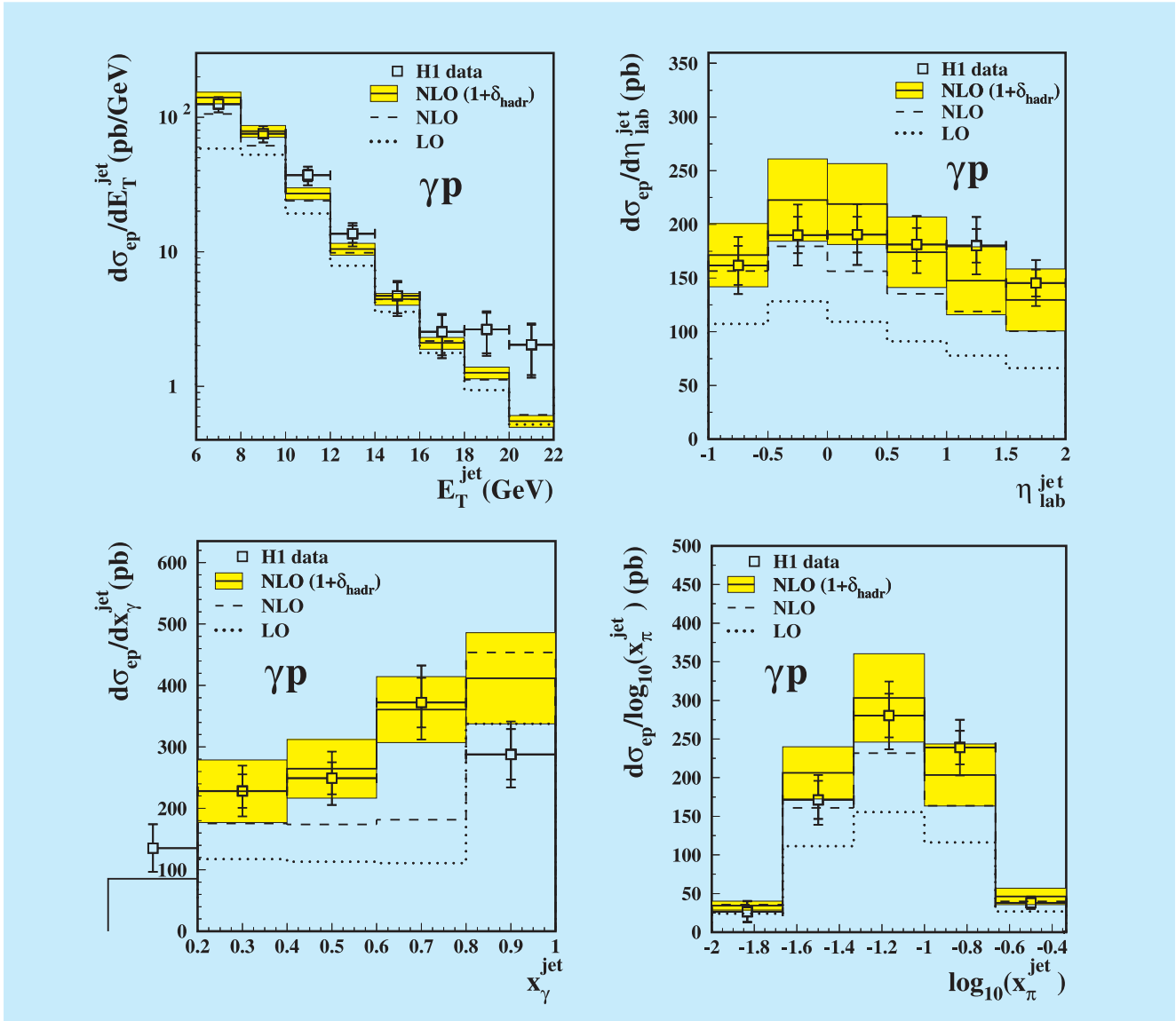


Abbildung 7: Wirkungsquerschnitte für die Photoproduktion von Dijet-Ereignissen mit assoziiertem, führendem Neutron als Funktion von mehreren kinematischen Variablen. Die Daten sind mit QCD-Rechnungen in führender (LO) und nächst-führender (NLO) Ordnung verglichen, wobei Unsicherheiten der Rechnungen als Bänder dargestellt sind.

ist eines der Pionen sehr langsam. In der experimentellen Verteilung der Massendifferenz $M(K\pi\pi) - M(K\pi)$ ist das D^* -Meson folglich als klar erkennbare Resonanz gut nachweisbar.

In einer der Publikationen wurde in Ereignissen mit auf diese Weise identifizierten D^* -Mesonen nach zu-

sätzlichen Protonen bzw. Anti-Protonen gesucht und die invariante Masse des D^*p -Paares gebildet. Wie in Abbildung 8 gezeigt, wurde in den Daten ein gebundener Zustand des D^* mit einem (Anti-)Proton bei einer Masse von etwa 3100 MeV nachgewiesen. Das Interesse an diesem erstmalig beobachteten Zustand ergibt sich aus seiner Masse, der engen Breite sowie der exo-

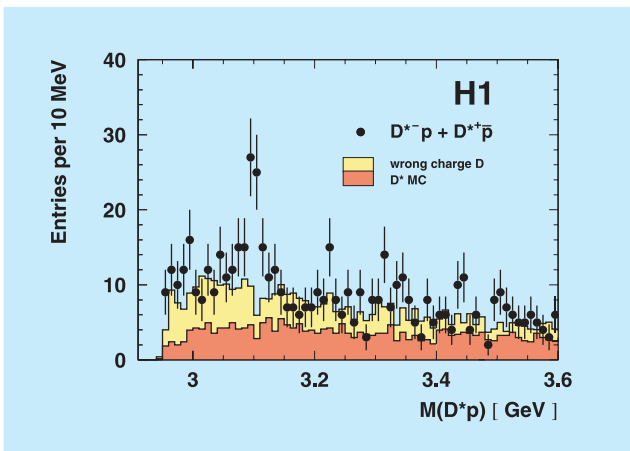


Abbildung 8: Verteilung der invarianten Masse $M(D^*p)$ für entgegengesetzte Ladungen des D^* -Mesons und des (Anti)protons, für in tief-unelastischer Streuung registrierte Ereignisse. Der Untergrund wird durch die Summe von Charm- (rot) und nicht-Charm-Anteilen (gelb) beschrieben. Bei 3.1 GeV ist eine resonante Struktur zu erkennen, die als Charm-Pentaquark interpretiert werden kann.

tischen Kombination von Teilchen: Im Quark-Modell kann man die D^*p -Resonanz als 5-Quark-Zustand, so genanntes Pentaquark, bestehend aus zwei leichten Up-Quarks (u), zwei leichten Down-Quarks (d) sowie einem schweren Anti-Charm-Quark (\bar{c}), beschreiben. Im Quark-Modell bestehen Mesonen aus gebundenen Zuständen von Quarks und Antiquarks, wie z. B. das Pion π^+ ($u\bar{d}$), und Baryonen aus 3 Quarks, wie z. B. das Proton p (uud).

Seit Jahren suchte man nach exotischen, gebundenen Zuständen von mehr als 3 Quarks. Zunächst ohne Erfolg, bis im Jahr 2003 von mehreren Experimenten gebundene 5-Quark-Zustände bei einer Masse von etwa 1530 MeV nachgewiesen wurden, die in ein Neutron und ein K^0 zerfallen und daher einen $udd\bar{s}$ Zustand bilden, wobei \bar{s} das Anti-Strange-Quark ist. Das Interesse an solchen Mehrquarkzuständen wurde erheblich durch das „Chiral Quark Soliton Model“ gefördert, in dem 5 Quarks metastabile, gebundene Zustände bilden können, was zu ganzen Multipletts von Strange- oder Charm-Pentaquarks führt, deren Mitglieder eine enge Breite und vorhersagbare Masse besitzen. Die experimentelle Evidenz beider Arten von Pentaquarks ist bisher allerdings noch kontrovers. Der bei H1 be-

obachtete Zustand wurde in verschiedenen Datenperioden, unabhängigen Analysen und sowohl in Photoproduktion als auch in der tief-unelastischen Streuung konsistent beobachtet und nach eingehender Prüfung publiziert.

In einer weiteren Publikation wurde die Erzeugung von D-Mesonen, D^+ , D^0 , D_s und D^* , eingehend untersucht, vgl. Abbildung 9. Die Häufigkeit für die Produktion der D-Mesonen in ep-Streuung berechnet sich aus der Faltung der Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung eines Charm-Quarks mit der Fragmentationsfunktion, die die Entstehung eines D-Mesons aus einem virtuellen c-Quark beschreibt. Während die Charm-Quark-Produktion störungstheoretisch berechenbar ist, kann man die Fragmentationsfunktion nur phänomenologisch darstellen. Die Messung einer Vielzahl von D-Mesonen mit verschiedenem Quarkinhalt, sowie der Vergleich mit Daten aus e^+e^- Experimenten und mit Photoproduktionsdaten von ZEUS erlaubt es daher, zu untersuchen, inwieweit deren Erzeugung vom Quarkinhalt und von der Art der Reaktion abhängt. Es zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeit der Heranziehung anderer, leichter Quarks zur Bildung von D-Mesonen im Rahmen der erzielten Genauigkeit unabhängig vom Reaktionstyp ist. Das bedeutet, dass die Fragmentationsfunktion universell ist, unabhängig vom harten Streuprozess und auch von der Skala, bei der Charm-Teilchen erzeugt werden.

Ebenso wie die D-Meson-Analyse machte die dritte Publikation zu schweren Quarks Gebrauch von der charakteristischen Lebensdauer der Charm- und Beauty-Teilchen. In einer erstmalig durchgeführten, inklusiven Analyse der Zerfallslängen konnte der CST-Detektor dazu benutzt werden, Ereignisse mit Charm- und Beauty-Teilchen anzureichern und ihre relativen Anteile zu bestimmen, ohne explizite Rekonstruktion einzelner D- oder B-Mesonen. Diese Methode erlaubte, die Anteile der schweren Quarks an der Protonstruktur zu messen, siehe Abbildung 10. Die Resultate bestätigten die Erwartungen in hervorragender Weise: für die Charm-Strukturfunktion F_2^c stimmten sie gut mit den bisher aus D^* -Rekonstruktionen, sowohl von H1 als auch von ZEUS extrapolierten Werten, überein. Die Strukturfunktion der Beauty-Quarks, F_2^b , wurde erstmalig gemessen. Im erfassten kinematischen Bereich großer Impulsüberträge Q^2 und nicht zu kleiner Partonimpulsanteile x haben Beauty-Quarks nur etwa

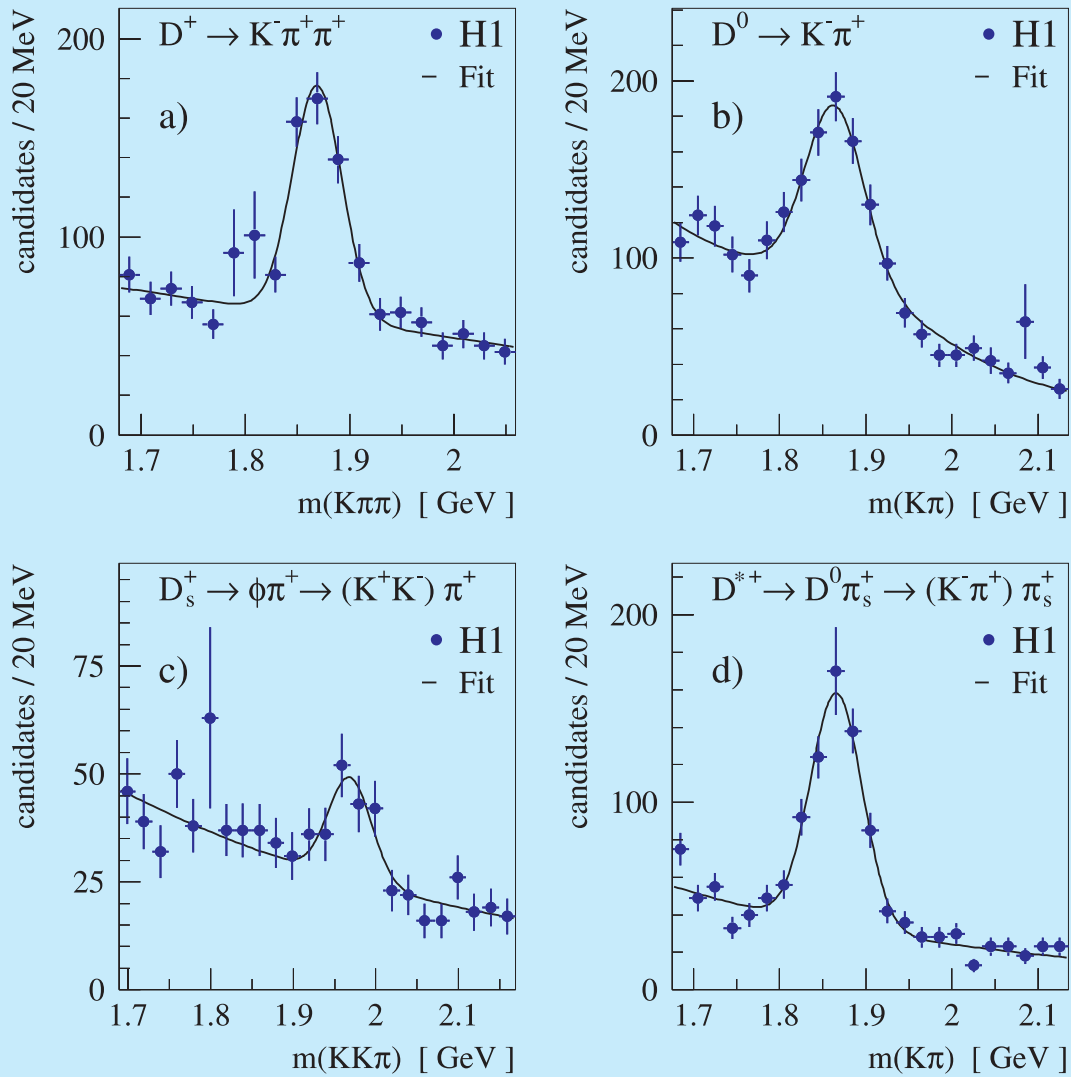


Abbildung 9: Rekonstruktion der vier untersuchten D -Mesonzustände D^+ , D^0 , D_s^+ und D^{*+} . Die Signifikanz der Signale ist erhöht, da in der Messung der CST-Siliziumdetektor zur Anreicherung der Charm-Signale benutzt wurde.

3% Anteil an der Gesamtdichte. Dieses Ergebnis wird recht genau durch die Analyse der Skalenverletzungen der diese Dichte beschreibenden Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ in der QCD vorhergesagt (Abbildung 10). Die

genaue Messung der Beauty-Quarkdichte im Proton ist eine herausragende Aufgabe, sowohl im Hinblick auf die Ausarbeitung der QCD als auch in Vorbereitung kommender Experimente am LHC bei CERN.

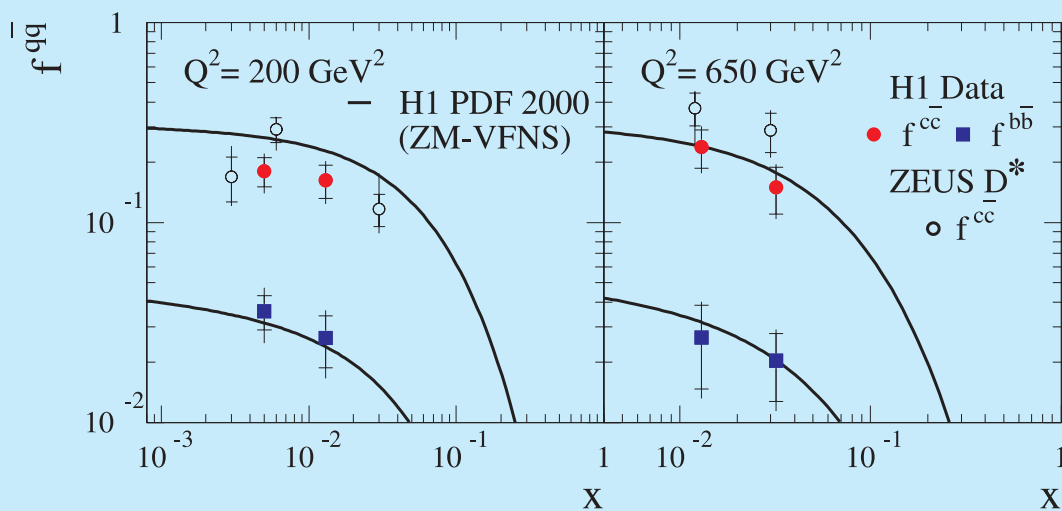


Abbildung 10: Relativer Beitrag der Charm- und Beauty-Erzeugung zum Gesamtwirkungsquerschnitt als Funktion von x bei verschiedenen, hohen Werten von Q^2 . Die Charm-ZEUS-Daten wurden aus D^* -Analysen erhalten. Der Beauty-Anteil wurde erstmalig bestimmt. Die Kurven sind absolute Vorhersagen einer NLO QCD-Analyse der Skalenverletzungen der Strukturfunktion F_2 .

Anti-Deuteron Produktion und Suche nach schweren geladenen Teilchen

Eine weitere Veröffentlichung beschäftigte sich mit der direkten Suche nach langlebigen, schweren geladenen Teilchen, die bei der Kollision von Photonen und Protonen erzeugt werden. Die Analyse ist unabhängig davon, ob es sich um bekannte oder um neuartige Teilchen außerhalb des Standardmodells handelt. Charakteristisch für solche Objekte ist ihr hoher spezifischer Energieverlust, der mit guter Genauigkeit in der zentralen Spurkammer gemessen wird. Im Fall von negativ geladenen Teilchen wurde kein Kandidat schwerer als ein Anti-Deuteron – dem Kern von Anti-Deuterium – und für positive Ladungen kein Teilchen schwerer als ein Triton – dem Kern von Tritium – gefunden. Hieraus konnte eine obere Grenze von 0.19 nb für den Produktionsquerschnitt ermittelt werden.

Dagegen wurden unter den negativ geladenen Teilchen 45 Anti-Deuteron Kandidaten beobachtet, die

aus einem Anti-Neutron und einem Anti-Proton bestehen. Die Erzeugung von Anti-Deuteronen kann mit Hilfe des so genannten Koaleszenz-Modells verstanden werden. Im Rahmen dieses Modells ist die Wahrscheinlichkeit, ein Anti-Deuteron zu produzieren, proportional zum Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten für die Erzeugung eines Anti-Protons und eines Anti-Neutrons bei der Kollision. Die Proportionalitätskonstante B_2 ist dabei ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass Anti-Proton und Anti-Neutron räumlich dicht beieinander und mit kleiner relativer Geschwindigkeit zueinander erzeugt werden und damit für den inversen Radius des bei der Kollision entstehenden „Feuerballs“. Der Vergleich der H1-Daten mit Resultaten, die in Proton-Proton- (pp), Proton-Nukleus- (pA) bzw. Nukleus-Nukleus- (AA) Kollisionen gewonnen wurden, kann so interpretiert werden, dass die Größe des Wechselwirkungsvolumens zum Zeitpunkt der Formation von Nukleonen bei der Kollision von elementarerer Objekten, wie Photon oder Proton, erheblich kleiner ist als im Falle von Kollisionen schwerer Ionen. Abbildung 11 verdeutlicht, dass dieser Unterschied mit zunehmender Schwerpunktenenergie wächst.

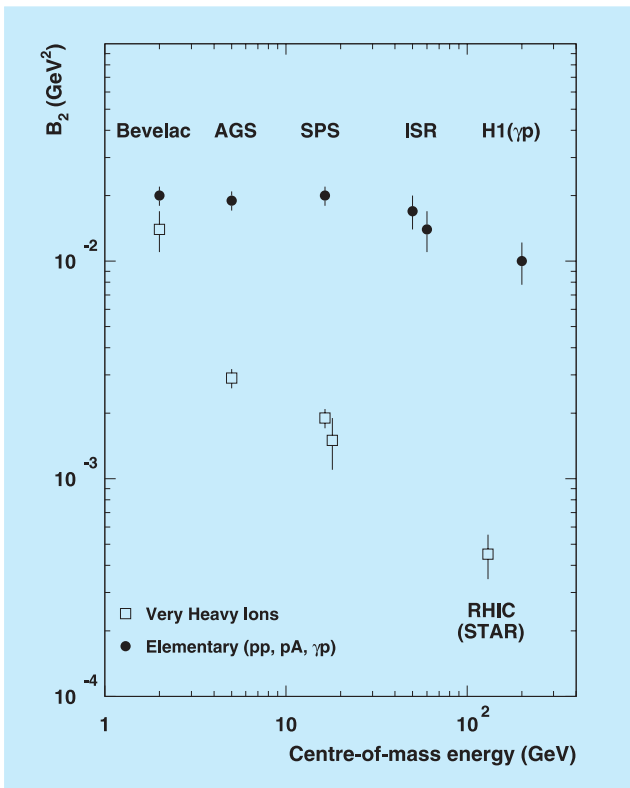


Abbildung 11: Der Parameter B_2 in Abhängigkeit von der Schwerpunktsenergie für Kollisionen von schweren Ionen (offene Quadrate) und elementareren Teilchen (schwarze Punkte). B_2 ist ein Maß für den inversen Radius des bei der Kollision entstehenden Feuerballs. Die Größe des Wechselwirkungsvolumens zum Zeitpunkt der Erzeugung von Nukleonen in der Kollision von elementareren Objekten, wie Photon oder Proton, ist erheblich kleiner als im Falle von Kollisionen schwerer Ionen. Diese Tendenz wächst mit zunehmender Schwerpunktsenergie.

Physik jenseits des Standardmodells

Obwohl es bisher kein etabliertes experimentelles Resultat gibt, das dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik widerspricht, gibt es verschiedene Hinweise darauf, dass dieses Modell erweitert werden muss. Insofern ist die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells bei jedem Vorstoß in einen höheren Energiebereich, wie auch HERA ihn darstellt, von größter Bedeutung.

Im Berichtsjahr wurden fünf Veröffentlichungen publiziert, in denen nach Physik jenseits des Standardmodells gesucht wurde. Eine dieser Veröffentlichungen beinhaltet eine generische, modellunabhängige Suche, drei beziehen sich auf die Suche nach supersymmetrischen Teilchen und in einer weiteren werden magnetische Monopole gesucht.

In bisherigen Suchen nach neuer Physik bei H1 wurden die Messdaten derart analysiert, dass nach Merkmalen eines spezifischen neuen Effektes (z. B. Existenz eines neuen Teilchens) gesucht wurde. Dagegen wurde in der im Folgenden besprochenen Veröffentlichung eine allgemeine Suche nach irgendeiner Abweichung von den Erwartungen des Standardmodells durchgeführt. Diese Suche ist modellunabhängig und somit sensitiv auf neue Physik, von der man möglicherweise heute noch keine konkreten Vorstellungen hat. Da neue Physik mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zuerst im Bereich hoher Teilchenenergien sichtbar wird, konzentrierte sich diese „generische“ Suche auf Streuereignisse, in denen Teilchen (Elektronen, Myonen, Photonen, Jets und Neutrinos) mit Transversalimpulsen größer als 25 GeV nachgewiesen wurden. Dabei wurden alle Ereignisse klassifiziert, die wenigstens zwei dieser hochenergetischen Teilchen aufwiesen, und dann die Massen und totalen transversalen Energien dieser Teilchensysteme bestimmt. Für jeden möglichen Kanal (z. B. $e-j-\gamma$, d. h. Elektron + Jet + Photon) wurde die Anzahl der gemessenen Ereignisse mit der Erwartung aus dem Standardmodell verglichen. Abbildung 12 zeigt, dass für nahezu alle erfassten Kanäle eine gute Übereinstimmung mit der Erwartung gegeben ist. Nur die Ereignisklasse $\mu-j-\nu$, mit Muon, Jet und Neutrino, zeigt eine größere Abweichung. Die Wahrscheinlichkeit, dass solch eine Abweichung als statistische Fluktuation der Erwartung des Standardmodells eintritt, beträgt jedoch einige Prozent, d. h. sie ist nicht so signifikant, dass man die Entdeckung eines neuen Effektes behaupten könnte. Der Überschuss von Ereignissen dieser Topologie wurde auch schon in früheren spezifischen Analysen beobachtet (siehe Jahresberichte 2002 und 2003) und ist eines der hochinteressanten Rätsel in den HERA-Daten. Die erwartete signifikante Erhöhung der Luminosität in der HERA II Periode sollte erlauben, die Frage der Herkunft dieser Ereignisse schlüssig zu beantworten.

Symmetrie ist in der Physik ein sehr erfolgreiches Prinzip zum Verständnis von Zusammenhängen. Im Stan-

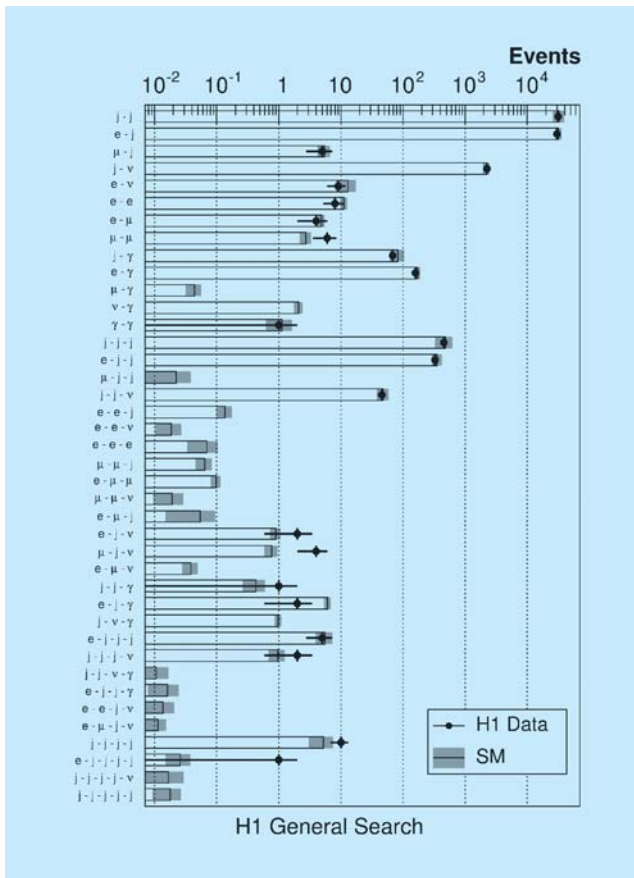


Abbildung 12: Allgemeine Suche nach Physik jenseits des Standardmodells (SM). Ereigniszahlen für Daten (Messpunkte) und die Simulation (Histogramm) für alle untersuchten Reaktionskanäle (e = Elektron; μ = Muon; j = Jet; v = Neutrino; γ = Photon). Die Fehlerbänder an der Erwartung beinhalten die Modellunsicherheiten und die experimentellen systematischen Fehler.

Standardmodell gibt es bezüglich des Spins der Teilchen eine Asymmetrie: die Materieteilchen (Quarks und Leptonen) sind Fermionen mit halbzahligen Spin, wohingegen die für die Wechselwirkungen verantwortlichen Austauschteilchen Bosonen mit ganzzahligen Spin sind. Ein theoretisch sehr vielversprechendes Modell, die Supersymmetrie, stellt eine neue Verbindung zwischen den Materieteilchen und den Eichbosonen her. Die Supersymmetrie postuliert für jedes uns heute bekannte Quark und Lepton einen supersymmetrischen Partner, Squark und Slepton, mit Spin 1 und umgekehrt zu jedem Eichboson einen Partner, Gaugino, mit halb-

zahligen Spin. Da diese supersymmetrischen Partner bis heute nicht gefunden wurden, ist die Supersymmetrie sicherlich gebrochen und diese neuen Teilchen haben hohe Massen. Theoretische Überlegungen zeigen jedoch, dass einige supersymmetrische Teilchen unter Umständen im HERA energetisch zugänglichen Bereich produziert werden könnten. Die neuen supersymmetrischen Teilchen werden durch eine neue Quantenzahl (R -Parität) mit $R = -1$ charakterisiert, wogegen alle uns „bekannten“ Teilchen $R = 1$ besitzen. Die im Folgenden besprochenen Veröffentlichungen zur Suche nach supersymmetrischen Teilchen konzentrieren sich auf Prozesse, in denen supersymmetrische Teilchen einzeln produziert werden, und in denen somit die R -Parität nicht erhalten ist.

In einer Veröffentlichung wurde nach Squarks gesucht, die in der Elektron-Quark-Fusion produziert werden ($\text{Elektron} + \text{Quark} \rightarrow \text{Squark}$). Es wurde eine große Anzahl möglicher Zerfallskanäle des Squarks untersucht, sowohl solche, in denen die R -Parität auch im Zerfall verletzt ist, als auch solche, in denen am Ende der Zerfallskaskade das leichteste supersymmetrische Teilchen auftritt, das dann den Detektor ungesehen verlässt und dadurch zu einer messbaren Verletzung der transversalen Energiebilanz führt. In allen untersuchten Kanälen wurden Ereignisraten gesehen, die gut mit den Erwartungen des Standardmodells ohne supersymmetrische Erweiterung übereinstimmen. In Abbildung 13 ist dies

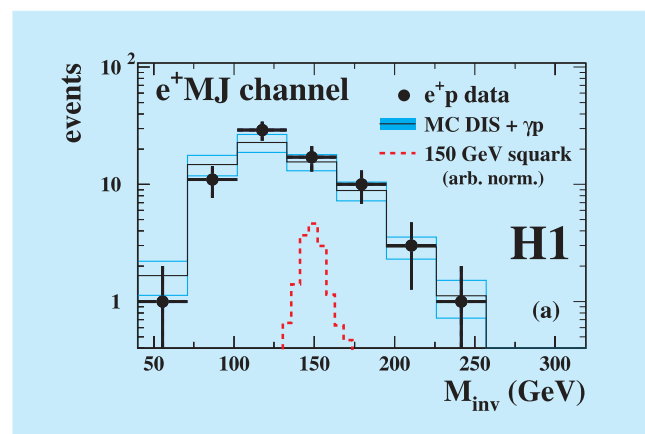


Abbildung 13: Spektrum der Elektron-Multijet-Masse verglichen mit der Erwartung des Standardmodells. Gestrichelt eingezeichnet ist die Erwartung für ein Squark der Masse 150 GeV in frei gewählter Normalisation.

exemplarisch für die Ereignisklasse Elektron + Multijet gezeigt. Aus der Nichtbeobachtung von Squarks kann man eine obere Grenze für deren Produktionswahrscheinlichkeit bestimmen und damit Einschränkungen der möglichen Parameter supersymmetrischer Modelle herleiten. Diese ergeben z. B., dass für eine Stärke der hier relevanten R-paritätsverletzenden supersymmetrischen Kopplung λ in der Größenordnung der elektromagnetischen Kopplungsstärke die Existenz von Squarks unterhalb einer Masse von 275 GeV ausgeschlossen werden kann.

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik gibt keine Erklärung für die Massen der elementaren Teilchen. Besonders das Top-Quark zeichnet sich durch seine extrem große Masse von 178 GeV aus, eine bislang nicht verstandene Tatsache. Auch in supersymmetrischen Modellen fällt dem Partner des Top, dem Top-Squark oder Stop, möglicherweise eine besondere Rolle zu. In der zweiten Veröffentlichung zur Supersymmetrie wird nach einem speziellen Zerfallskanal, dem bosonischen Zerfall des Stop gesucht. Das in der Fusion von Positron und Down-Quark produzierte Stop zerfällt dabei in ein Beauty-Squark und ein reelles W-Boson. Wenn das W-Boson in Lepton und Neutrino zerfällt, haben diese Ereignisse die Topologie der oben schon erwähnten, bei H1 gefundenen Ereignisse mit einem Lepton, einem Jet und fehlendem Transversalimpuls. In der speziell für die Stop-Suche durchgeführten Analyse wurden diese Ereignisse auch wiedergefunden, jedoch konnte im hadronischen Zerfall des W kein äquivalentes Signal etabliert werden. Somit ist diese Interpretation der Ereignisse nicht wahrscheinlich. Aus der Nichtbeobachtung eines signifikanten Signals kann eine Masse des Top-Squarks unterhalb von 260 GeV ausgeschlossen werden, sofern das Top-Squark mit der Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung koppelt.

In der dritten Veröffentlichung zur Supersymmetrie wurde nicht nach Squarks sondern nach supersymmetrischen Partnern der Eichbosonen gesucht. Im untersuchten Kanal produziert das einlaufende Elektron unter Austausch eines Selektrens, des supersymmetrischen Partners des Elektrons, mit einem Quark des Protons ein Neutralino und ein auslaufendes Quark, das als Teilchenjet nachgewiesen wird. Das Neutralino zerfällt in diesem Szenario dann in ein Photon und ein Gravitino (supersymmetrischer Partner des Gravitons), das den Detektor unbeobachtet verlässt. Die gesuchte Ereignis-

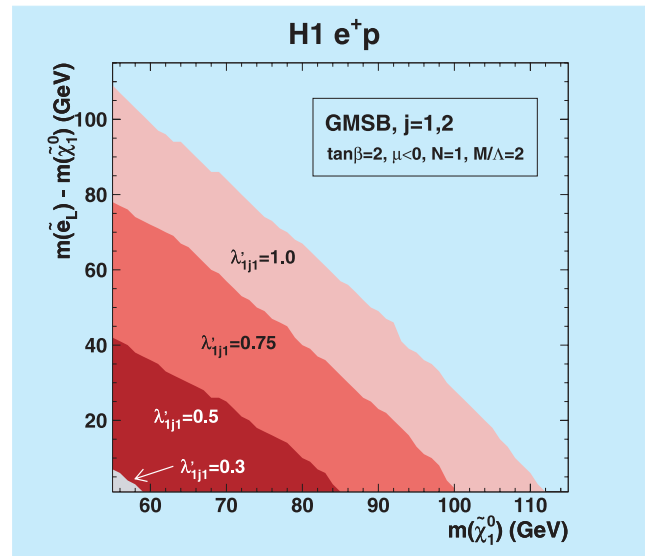


Abbildung 14: Ausschlussbereiche (dunkle Flächen) für die Masse des Neutralinos und die Massendifferenz zwischen Neutralino (χ) und Selektion als Funktion der Stärke λ der R-paritätsverletzenden Kopplung.

topologie besteht daher aus einem Jet, einem Photon und einer dem Gravitino zugeschriebenen Unbalance des Transversalimpulses. Nach der Selektion bleibt in den Daten nur ein einziges Ereignis übrig, in guter Übereinstimmung mit der Erwartung des Standardmodells, die durch radiative Charged-Current-Ereignisse gegeben ist. Aus der Nichtbeobachtung eines signifikanten Signals können im Rahmen spezifischer Modelle der Supersymmetrie Grenzen für die Masse des Neutralinos und die Massendifferenz zwischen Neutralino und Selektion gewonnen werden. Diese Grenzen, die in Abbildung 14 gezeigt sind, sind unabhängig vom Squarksektor des Modells. Unter der Annahme einer Kopplungsstärke von $\lambda = 1$ können untere Grenzen für die Masse des Selektrens von bis zu 112 GeV und des Neutralinos von bis zu 164 GeV erreicht werden.

Die letzte der fünf Veröffentlichungen zur Suche nach Physik jenseits des Standardmodells beinhaltet die Suche nach magnetischen Monopolen. Dirac zeigte 1931, dass magnetische Monopole eine Erklärung der Quantisierung der elektrischen Ladung liefern. Bisher hatten alle Suchen nach diesen Teilchen negative Resultate. H1 ist das erste Experiment, in dem

nach der Produktion von magnetischen Monopolen in hochenergetischer Elektron-Proton-Streuung gesucht wird. In diesen Streuprozessen produzierte Monopole würden aufgrund ihrer extrem hohen Ionisationsdichte mit großer Wahrscheinlichkeit im Material des den Wechselwirkungspunkt umgebenden Strahlrohres permanent steckenbleiben. Teile des in den Jahren 1995–1997 verwendeten Strahlrohres wurden in einem SQUID (Superconducting Quantum Mechanical Interference Device) auf das Vorhandensein magnetischer Monopole hin untersucht. Während beim Durchgang eines Dipols die beiden Pole genau gleich große, jedoch entgegengesetzte Ströme in der Leiterschleife induzieren, die sich nach dem Durchgang daher vollständig kompensieren, würde beim Passieren eines Monopols ein permanenter Strom in der hochempfindlichen supraleitenden Leiterschleife induziert. Die Untersuchung vieler einzelner Teilstücke des Strahlrohrs ergab keinen Hinweis auf das Vorhandensein eines magnetischen Monopols. Dieses Nullresultat erlaubt es, die in Abbildung 15 dargestellten oberen Grenzen für die Produktionsrate von Monopolen als Funktion der Monopolmasse und Monopolstärke zu bestimmen.

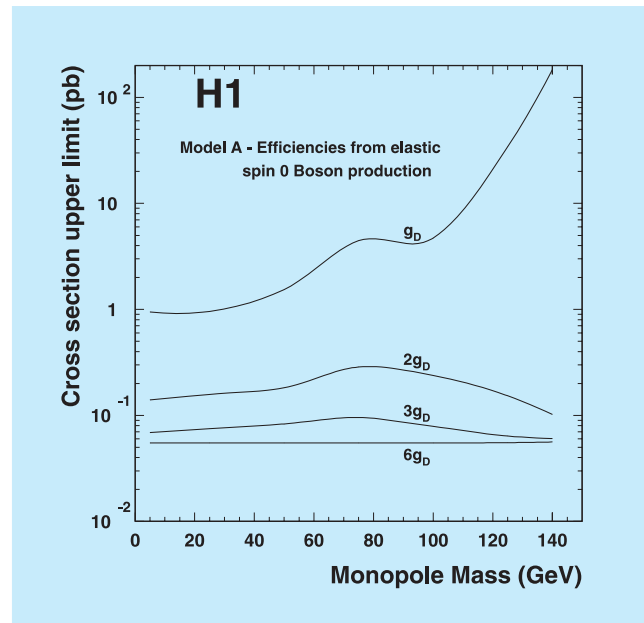


Abbildung 15: Obere Grenze des Wirkungsquerschnitts für die Produktion eines magnetischen Monopols als Funktion der Monopolmasse für Monopolstärken von einer bis zu 6 Diracmonopoleinheiten (g_D).

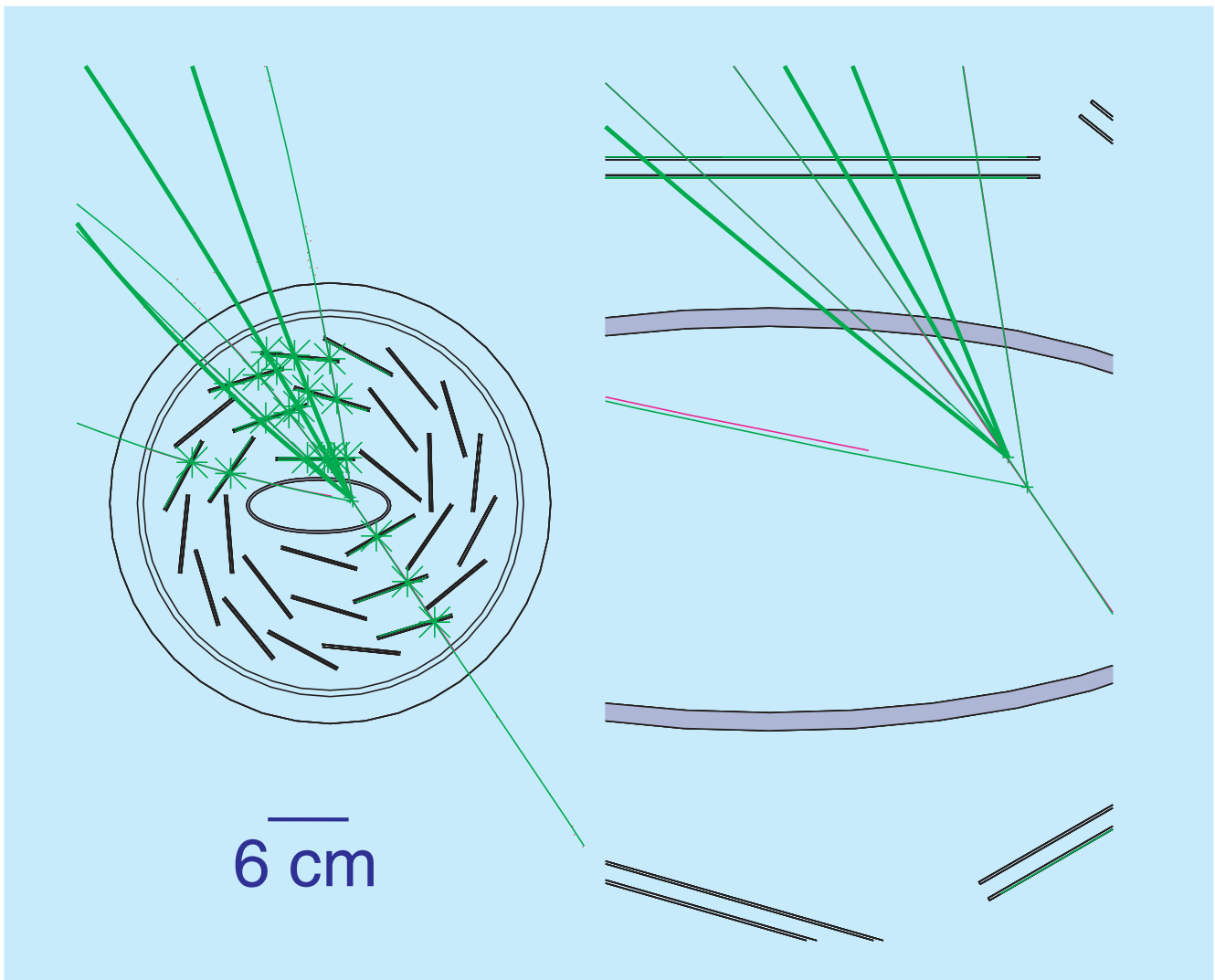


Abbildung 16: Ereignis mit einem rekonstruierten sekundären Vertex im ZEUS Mikrovertexdetektor. Das Ereignis ist ein Kandidat für den Zerfall eines Beauty-Quarks.

ZEUS Experiment

Beteiligte Institute: Univ. of the Aegean Chios, Inst. Phys. Technol. Almaty, NIKHEF und Univ. Amsterdam, ANL Argonne, Humboldt Univ. Berlin, Andrews Univ. Berrien Springs, Univ. und INFN Bologna, Univ. Bonn, Univ. Bristol, RAL Chilton, Ohio State Univ. Columbus, Univ. della Calabria und INFN Cosenza, Inst. of Nucl. Physics und Jagellonian Univ. Cracow, AGH 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. Autónoma Madrid, McGill Univ. Montreal, Engin. Phys. Inst. und State Univ. Moscow, MPI München, 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, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Inst. of Technol. Tokyo, Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. del Piemonte Orientale Novara, Univ. Toronto, KEK Tsukuba, Pennsylvania State Univ. University Park, Inst. for Nucl. Stud. und Univ. Warsaw, Meiji Gakuin Univ. Yokohama, DESY Zeuthen.

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

Von Januar bis Mitte August lieferte HERA sehr erfolgreich Luminosität mit Positronen. Im Juni wurden mit etwa 100 mA Protonstrom und fast 50 mA Positronenstrom die Designwerte erreicht. Die Polarisation erreichte regelmäßig Werte über 40%. Nach der Reparatur eines Vakuumslecks nahe der H1 Wechselwirkungszone Ende Juni musste bis Mitte August der Strom auf 90 mA für den Protonenstrahl und etwa 40 mA für den Positronenstrahl begrenzt bleiben um Strahlenschäden am H1 Detektor zu vermeiden. Von 78 pb^{-1} die HERA geliefert hat wurden 42 pb^{-1} von ZEUS aufgezeichnet. Die Verluste lagen hauptsächlich am hohen Protonenuntergrund von HERA und an Instabilitäten des Datennahmesystems. Beide Probleme wurden im Juni gelöst. Mitte August begann eine etwa 8 wöchige Betriebsunterbrechung, in der bei ZEUS lediglich kleinere Wartungs- und Reparaturarbeiten durchgeführt wurden. Nach dieser Unterbrechung wurde HERA auf Elektronen umgestellt. Seit Anfang Dezember produziert HERA routinemäßig Luminosität mit Elektronen. Die Strahlströme sind noch begrenzt, da nach umfangreichen Umbauarbeiten in der Wechselwirkungsregion von H1,

das Vakuum dort konditioniert werden muss. Die spezifische Luminosität ist mit Werten von über $2 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ höher als der Designwert, damit werden trotz begrenzter Ströme hohe Luminositäten erreicht.

Für die Analyse beginnen die neuen, seit 2003 genommenen Daten, zunehmend wichtig zu werden. So wurden im Sommer vier Konferenzpapiere mit Analysen der neuen Daten zur Internationalen Hochenergiephysik Konferenz (ICHEP) in Peking geschickt. Darin werden erste Messungen des geladenen Stromes mit polarisierten Positronen, sowie Messungen schwerer Quarks mit dem Silizium-Mikrovertexdetektor beschrieben. Darüberhinaus hat ZEUS neun weitere Analysen mit den bis zum Jahr 2000 genommenen Daten veröffentlicht.

ZEUS Betrieb

HERA lieferte von Beginn des Jahres an regelmäßig Luminosität. Da im Shutdown des Vorjahres umfangrei-

che Arbeiten an den Wechselwirkungszonen der Experimente durchgeführt worden waren, wurden die Strahlströme langsam gesteigert, um das Vakuum zu konditionieren. Die in der Nähe des Wechselwirkungspunktes gelegenen Absorber für reflektierte Synchrotronstrahlung waren im Shutdown 2003 modifiziert worden. Seitdem spielt reflektierte Synchrotronstrahlung keine signifikante Rolle mehr beim Untergrund in ZEUS. Das Hauptproblem für eine effiziente Datennahme war Untergrund vom Protonstrahl. Häufige, kurze und sehr hohe Spitzen im Protonuntergrund führten regelmäßig zur Abschaltung der Hochspannung in der zentralen Driftkammer. In der ersten Hälfte des Jahres musste der Datennahmebetrieb wegen dieser Spitzen häufig für mehrere Stunden unterbrochen werden. Im Juni waren alle technischen Probleme im Protonspeicherring soweit unter Kontrolle gebracht, dass die Datennahme mit Strahlströmen von 100 mA Protonen auf fast 50 mA Positronen möglich wurde. Mitte Juni führte ein Vakuumleck in der Nähe der H1 Wechselwirkungszone zu einer etwa einwöchigen Betriebsunterbrechung, in der umfangreiche Reparaturen an der Strahlführung durchgeführt wurden. In der Folge musste der Strahlstrom auf etwa 90 mA Protonen und etwa 40 mA Positronen begrenzt bleiben, da sonst die Strahlrestgaswechselwirkungen zu Beschädigungen des H1 Detektors geführt hätten. Bis zur Betriebsunterbrechung im Sommer hat HERA 78 pb^{-1} geliefert, von denen 45 pb^{-1} mit rechteckhändig und 33 pb^{-1} mit linkshändig polarisierten Positronen produziert wurden. Davon hat ZEUS 42 pb^{-1} aufgezeichnet (25 pb^{-1} rechteckhändig und 17 pb^{-1} linkshändig polarisiert). Neben den Untergrundproblemen haben auch einige Instabilitäten des Datennahmesystems zu den Verlusten beigetragen. Im Juni war das Datennahmesystem soweit stabilisiert, dass die Effizienz der Datennahme wieder mit den besten Werten des Jahres 2000 vergleichbar war.

Am 16. August begann eine achtwöchige Betriebsunterbrechung, die bei ZEUS für kleinere Reparaturen sowie für Wartungsarbeiten benutzt wurden.

Während der Datennahme zeigte der supraleitende Solenoid Temperaturschwankungen, die gelegentlich zur Abschaltung führten. Im Juni wurde entdeckt, dass diese Temperaturschwankungen mit dem Ein- und Ausschalten der Niederspannungsversorgung des Straw-Tube-Trackers (STT) korreliert sind. Der STT wurde ursprünglich nur während der Datennahme eingeschaltet,

da trotz Kühlung in einigen Teilen des Detektors hohe Temperaturen beobachtet worden waren. Nach Entdeckung der Korrelation wurde der STT eingeschaltet gelassen. Der Solenoid lief daraufhin stabil, allerdings mit einem relativ hohen Heliumverbrauch. Während der Wartungsperiode wurde der Solenoid aufgewärmt und es stellte sich heraus, dass sich während des Ein- und Ausschaltens des STT das Isoliervakuum des Solenoiden kurzzeitig stark verschlechtert. Genauere Untersuchungen zeigten, dass eine Dichtung des Solenoiden, die in der Nähe des STT liegt, vorübergehend undicht wird, solange der STT nicht im thermischen Gleichgewicht ist. Offenbar führen Temperaturänderungen am Frustum, an dem der Solenoid hängt, zu mechanischen Spannungen am Flansch des Magneten, der die Dichtung enthält. Dieses temporäre Leck erklärt die Temperaturschwankungen während des Betriebes. Aus Zeitgründen war eine Reparatur innerhalb der laufenden Betriebsunterbrechung nicht möglich. Um einen stabilen Betrieb des Magneten zu gewährleisten und die Gefahr eines permanenten Lecks so gering wie möglich zu halten, wurde beschlossen, den STT zunächst nicht wieder in Betrieb zu nehmen. Mit der Planung einer möglichen Reparatur wurde sofort begonnen, um sie während der Betriebsunterbrechung im Sommer 2005 durchführen zu können. Jeder Zugang zur Elektronik des Vorwärtsdetektors sowie zum Frustum und der betroffenen Dichtung des Solenoiden erfordert den Ausbau des gesamten Vorwärtsdetektors. Um die Reparaturzeit zu minimieren und ein Belüften des Strahlrohres zu vermeiden, ist geplant eine Vorrichtung zu bauen, die es erlauben wird, den Vorwärtsdetektor über das Strahlrohr und den ersten Magneten nach vorne aus dem Detektor zu ziehen und in dieser Position die notwendigen Reparaturen vorzunehmen.

Am 5.11.2004 begann HERA mit Elektronenbetrieb, nachdem der Beschleuniger zunächst mit Positronen in Betrieb genommen und dann auf Elektronen umgestellt worden war. Seit dem 5.12. liefert HERA regelmäßig Luminosität mit langsam steigenden Strahlströmen. Die Strahlströme sind noch begrenzt, da nach umfangreichen Umbauarbeiten in der Wechselwirkungsregion von H1, das Vakuum dort konditioniert werden muss. Die spezifische Luminosität ist mit Werten von über $2 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ höher als der Designwert. Damit werden trotz begrenzter Ströme hohe Luminositäten erreicht. Der Detektor, Trigger und Datennahme laufen stabil. Die Effizienz der Datennahme sowie die Daten-

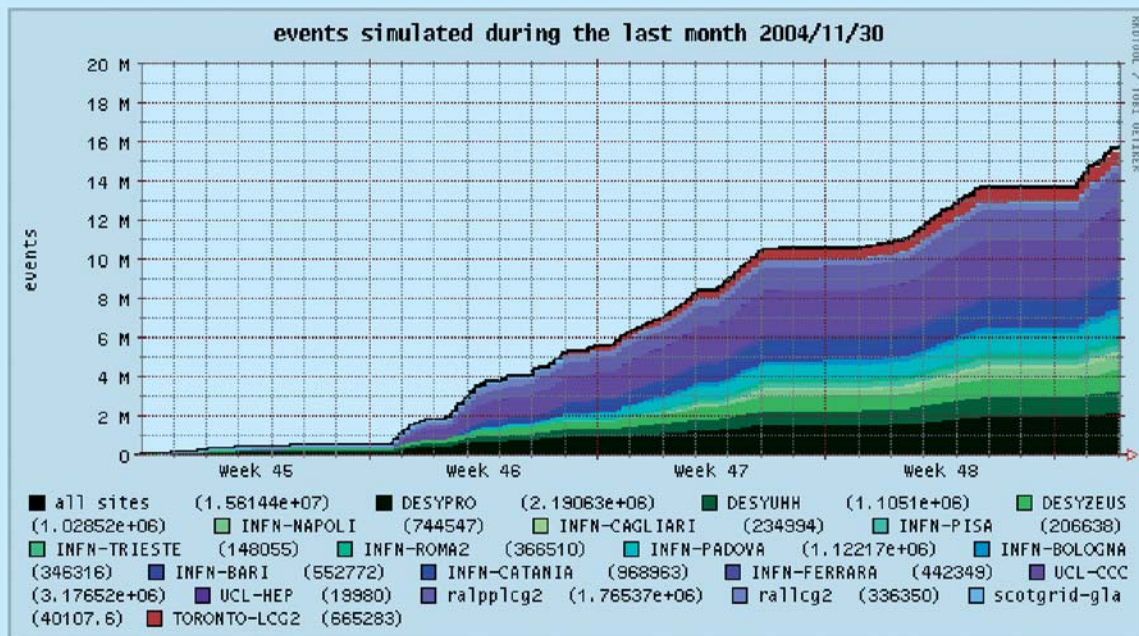


Abbildung 17: Anlauf der Grid-basierten Monte Carlo-Produktion bei ZEUS im November 2004. Gezeigt sind die integrierten Ereignisraten, farblich differenziert nach den einzelnen Produktionsstätten in Deutschland (DESY und Univ. Hamburg), Großbritannien (UCL, RAL und Scotgrid), Italien (INFN) und Kanada (Toronto).

qualität sind sehr gut. Die Kammerströme sind weit von jeder Begrenzung entfernt und die Untergrundsituation lässt sicher erwarten, dass ZEUS in der Lage ist auch bei höchsten Strahlströmen problemlos zu messen.

ZEUS Datenverarbeitung

Die Rohdaten der bis August andauernden e^+p -Runperiode wurden zunächst zeitnah auf der neuen Rekonstruktionsfarm mit 70 Prozessoren von 3 GHz Taktfrequenz rekonstruiert. Nach dem Ende des Positronenbetriebs wurden die Daten mit erheblichen Verbesserungen in der Rekonstruktionssoftware sowie im Vertexdetektor-Alignment innerhalb eines Monats reprozessiert, wobei eine maximale Produktionsrate von 3.2 Millionen Ereignissen pro Tag erreicht wurde. Die Leistung des zentralen Analysesystems ZARAH konnte

ebenfalls weiter gesteigert werden: im Laufe des Jahres 2004 wurden rund 630 000 Analysejobs gerechnet.

Im Bereich der Monte Carlo Simulation sind die Anforderungen an die Rechenleistung durch die größere Komplexität der HERA II Ereignisse erheblich gestiegen. Aus diesem Grunde war bereits im Herbst 2003 das „ZEUS Grid Projekt“ gestartet worden, in dessen Rahmen das ZEUS Produktionssystem auf die Erfordernisse des modernen „Grid-Computings“ umgestellt wurde. Diese Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit der DESY IT-Gruppe durchgeführt. Im November 2004 lief erstmals die automatisierte Produktion auf dem Grid an (Abb. 17), wobei auf Anhieb tägliche Produktionsraten von 1 Million Ereignissen erreicht und überschritten wurden. Zur Zeit sind dem ZEUS-Produktionssystem weltweit 19 Grid-Cluster angeschlossen, die sich an Instituten in Großbritannien, Italien, Kanada und Deutschland befinden.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden die ersten Resultate basierend auf den in den Jahren 2003 und 2004 aufgezeichneten Positron-Proton Kollisionen auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Diese Daten entsprechen etwa einem Drittel des Datensatzes der Jahre 1994–2000. Der größte Teil der neuen Daten wurde mit longitudinal polarisiertem Positronstrahl gewonnen und zwar etwa jeweils zur Hälfte links- beziehungsweise rechtshändig. Außerdem ermöglichen die zusätzlich im Jahr 2000 installierten Komponenten des ZEUS Detektors, der Mikrovertexdetektor und der Straw-Tube-Tracker, entscheidende Verbesserungen bei Spur- und Vertexrekonstruktion. Diese Veränderungen verlangen aber andererseits umfangreiche systematische Studien bevor sie ausreichend verstanden sind, um sie in physikalischen Publikationen verwenden zu können. Wir diskutieren hier zunächst einige dieser vorläufigen Ergebnisse, wie sie als sogenannte „Preliminary Results“ auf internationalen Fachtagungen vorgestellt worden sind.

Im Übrigen kommt die Analyse der HERA I Daten der Jahre 1994–2000 allmählich zum Abschluss. Hier dominieren nun jene Untersuchungen, die sehr umfangreiche Studien der systematischen Messfehler erfordern. In diesem Bericht stellen wir einen Querschnitt dieser Ergebnisse vor. Schließlich geben wir einen Ausblick auf die für diese Resultate zu erwartenden Verbesserungen in den kommenden Jahren.

Verletzung der Parität in der schwachen Wechselwirkung

Seit den theoretischen Arbeiten von Lee und Yang und den Experimenten von C.S. Wu in den späten 50er Jahren wissen wir, dass die schwache Kraft, die zum Beispiel für den radioaktiven Betazerfall verantwortlich ist, die Symmetrie gegenüber Raumspiegelungen maximal verletzt. Das heißt, die schwache Kraft koppelt jeweils nur an linkshändige Teilchen, bzw. rechtshändige Antiteilchen. Die Natur kann somit eindeutig links und rechts unterscheiden. Die Ereignisse des geladenen Stromes bei HERA unterliegen denselben Regeln. Die im Rahmen des HERA Upgrade eingebauten Spinrotatoren ermöglichen es, einen wohldefinierten lon-

gitudinalen Spinzustand des Positron- bzw. Elektronstrahls einzustellen und die Paritätsverletzung genau zu vermessen. Durch Einstellen des bevorzugten oder des unterdrückten longitudinalen Spinzustands (man bezeichnet diesen auch als Helizität) können wir die schwache Wechselwirkung verstärken oder abschwächen. Wenn der Strahl vollständig polarisiert wäre, sollte man die schwache Wechselwirkung sogar vollständig aus- bzw. einschalten können. Abweichungen von diesem erwarteten Verhalten könnten Hinweise auf die Existenz bisher unbekannter schwerer W Bosonen mit rechtshändiger Kopplung liefern.

Für diese Analysen stehen aus den Jahren 2003 und 2004 Daten mit einer integrierten Luminosität von etwa 40 pb^{-1} zur Verfügung. Diese Daten sind etwa zur Hälfte links- beziehungsweise rechtshändig polarisiert. Der Grad der Polarisation liegt bei durchschnittlich 31%. Mit dieser Datenmenge erwartet man noch keine Empfindlichkeit für Phänomene außerhalb des Standardmodells der Teilchenphysik. Diese Analysen dienen jedoch dazu, die Methode zu testen und zu etablieren.

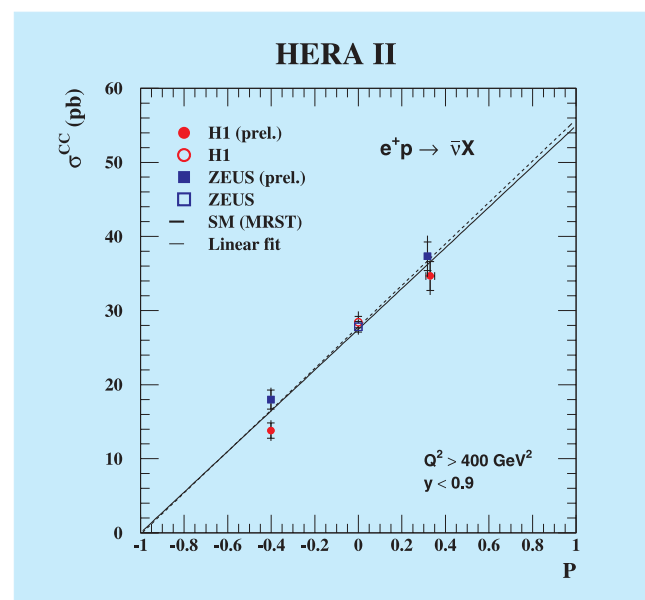


Abbildung 18: Der totale Wirkungsquerschnitt für Ereignisse des geladenen Stromes in tiefinelastischen e^+p Kollisionen als Funktion der longitudinalen Polarisation des Positronenstrahls. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt die Erwartung des Standardmodells der Teilchenphysik.

Die vorläufigen Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 18 dargestellt. Im Einzelnen sind die Werte des Wirkungsquerschnitts für geladene Stromereignisse als Funktion des durchschnittlichen Polarisationsgrades aufgetragen. Die Punkte bei Polarisationsgrad $\mathcal{P} = 0$ stammen aus den Messungen mit unpolarisierten Leptonen bei HERA I. Sowohl die vorläufigen Ergebnisse von ZEUS als auch die von H1 sind zu sehen. Eine lineare Extrapolation der Ergebnisse zu $\mathcal{P} = -1$, d. h. zu vollständig linkshändiger Polarisation (in der Abbildung als Gerade dargestellt) zeigt in der Tat, dass dort der Wirkungsquerschnitt nahezu null ist. Das bedeutet, dass die schwache Wechselwirkung nicht an linkshändige Antiteilchen koppelt. Diese Darstellung demonstriert eindrucksvoll das Potenzial von HERA bei voller Luminosität. Allerdings ist zum jetzigen Zeitpunkt die Aussage noch mit einem recht großen statistischen Fehler verbunden.

Identifikation schwerer Quarks durch Messung des Stoßparameters

Aus den Produktionsraten der schweren Quarks, Charm (c) und Beauty (b), bei HERA lassen sich wichtige Einblicke in Mechanismen der starken Wechselwirkung gewinnen. Diese wird, so glauben wir, von der Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben. Die mathematische Komplexität der QCD erlaubt allerdings nur wenige präzise Vorhersagen. Die Vorhersagen der Produktionsraten für c und b sollten jedoch, aufgrund ihrer vergleichsweise großen Massen, verlässlich sein. Diese Vorhersagen zu überprüfen, ist daher Teil des Programms des Studiums der starken Kraft bei HERA. Des Weiteren sind diese Produktionsraten eng mit den Partondichten im Proton verknüpft. Ein detailliertes Verständnis dieser Raten sollte daher auch das Wissen um die Struktur von Hadronen wesentlich voranbringen.

Schwere Quarks können auf unterschiedliche Weise identifiziert werden. Eine bewährte Standardmethode zum Identifizieren von c-Quarks verwendet die Zerfallskette über ein D-Meson, das ein c-Quark enthält. Bei b-Quarks bietet sich dagegen die hohe Masse von ca. 4 GeV als Unterscheidungsmerkmal an. Hierzu betrachtet man die Verteilung des Transversalimpulses in Jets, die als Kandidaten für den Zerfall eines schweren Quarks in Betracht kommen. Diese Verteilung ist

bei b-Quarks zu sehr viel höheren Werten verschoben als bei leichteren Quarks wie c, u, d und s. Diese Verschiebung erlaubt eine statistische Trennung der b-Quarks.

Eine andere vielversprechende Methode macht sich die lange Lebensdauer der schweren Quarks zu Nutze. Dabei versucht man den makroskopischen Stoßparameter des Quarks im Detektor zu rekonstruieren. Für b-Quarks liegt dieser bei 500 μm . Bei c-Quarks sind es um zwischen 100 und 300 μm . Mithilfe des ZEUS Mikrovertexdetektors, der speziell dafür entworfen und gebaut wurde, kann diese Methode nun zum ersten Mal bei ZEUS angewendet werden. Abbildung 16 zeigt ein Ereignis im ZEUS Mikrovertexdetektor mit einem sekundären Vertex, der vom Zerfall eines schweren Quarks stammen könnte. Für diese Messung muss allerdings die Position des ZEUS Mikrovertexdetektors relativ zum zentralen Spurdetektor von ZEUS mit hoher Genauigkeit bestimmt und die Ausrichtung aller Messebenen im Innern errechnet werden. Dieses sogenannte „Alignment“ verlangt viel Sorgfalt und Zeit und hat die endgültige Präzision noch nicht erreicht. Die Präzision ist jedoch für erste Untersuchungen ausreichend. Zwei dieser vorläufigen Messungen werden im Folgenden beschrieben.

Die erste Messung betrifft die Verbesserung der Identifikation von geladenen D^\pm Mesonen. Zunächst werden in guten Positron-Proton Ereignissen ein Kaon- und zwei gegensätzlich geladene Pionkandidaten kombiniert. Dann wird für diejenigen Kombinationen, deren Massen mit der eines geladenen D^\pm Mesons verträglich sind, die Vertexrekonstruktion wiederholt und überprüft, ob sich die rekonstruierten Spuren der drei Zerfallsprodukte des geladenen D^\pm zu einem, vom Primärvertex des Ereignisses wohl separierten sekundären Vertex, kombinieren lassen. In Abbildung 19 ist die Signifikanz des Abstandes dieser Sekundärvertices vom Primärvertex aufgetragen. Die Signifikanz ist der Quotient aus gemessenem Abstand und dem erwarteten Fehler der Messung. Diese Größe trägt außerdem ein Vorzeichen, und zwar positiv, wenn der Sekundärvertex auf der richtigen Seite des Primärvertex, also in Flugrichtung des rekonstruierten D^\pm liegt. Fällt der Sekundärvertex in die entgegengesetzte Hemisphäre des Ereignisses, dann ist die Signifikanz negativ. Negative Signifikanzen kommen durch das begrenzte Auflösungsvermögen des Detektors zustande: liegt der Se-

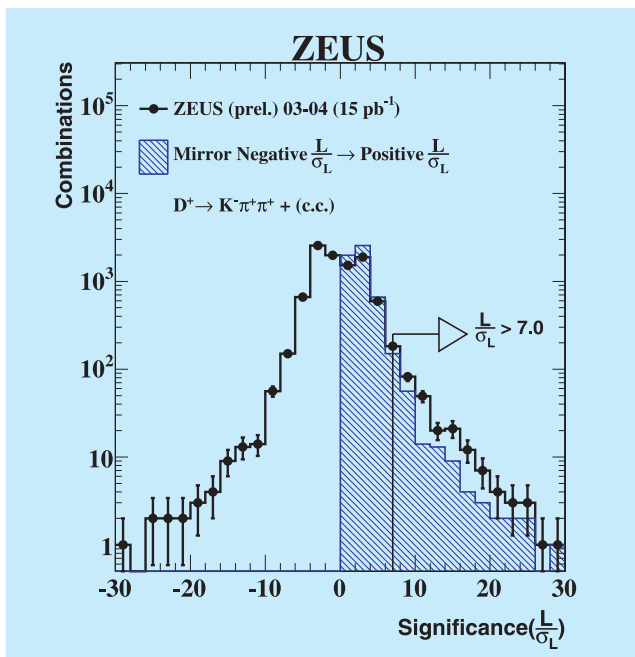


Abbildung 19: Verteilung der Signifikanz des transversalen Abstandes des Sekundärvertex vom Primärvertex für Ereignisse mit rekonstruierten D^\pm Kandidaten.

kundärvertex zu nahe am Primärvertex, dann kann der Detektor die Vertices nicht wirklich trennen und der Sekundärvertex wird in 50% der Fälle auf der „falschen“ Seite des Primärvertex rekonstruiert. Dieser Effekt ist allerdings für die Extraktion der wahren Abstandsverteilung von großem Nutzen. Man verwendet nämlich den negativen Teil der Verteilung, um den entsprechenden Anteil im positiven Teil der Verteilung abzuschätzen und entsprechend abzuziehen. Das was nach dieser statistischen Subtraktion übrig bleibt, ist der Anteil der Vertices, die einen echten messbaren Abstand vom Primärvertex haben.

Abbildung 20 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Man sieht die Verteilung der invarianten Masse der D^\pm Kandidaten nach der oben beschriebenen statistischen Subtraktion. Zum Vergleich ist, klein dargestellt, dieselbe Verteilung ohne Anwendung der Sekundärvertexmessung zu sehen. Die Sekundärvertexmethode liefert ein gutes Signal zu Untergrund Verhältnis, während ohne diese Methode, siehe kleines Bild, praktisch kein Signal zu erkennen ist.

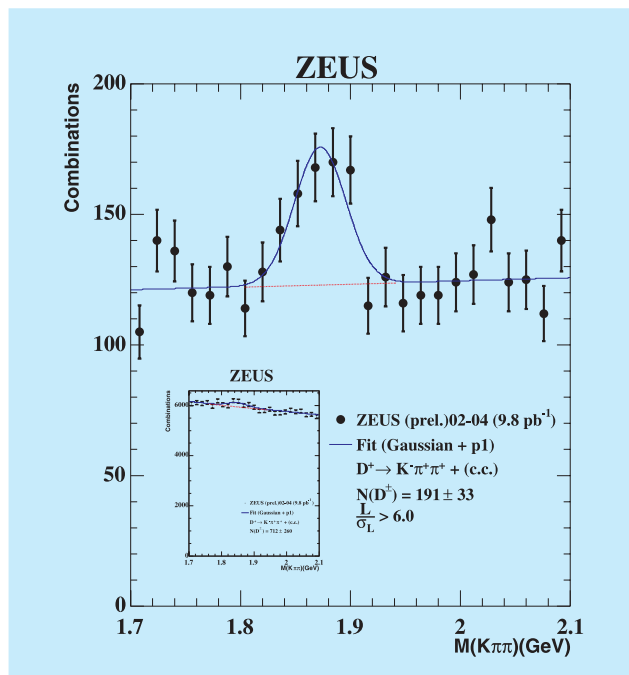


Abbildung 20: Invariante Masse der D^\pm Kandidaten nach Subtraktion des negativen Anteils der Signifikanzverteilung des Sekundärvertexabstands für Signifikanzen $\frac{L}{\sigma_L} > 6$. Zum Vergleich, klein gezeigt, ist die entsprechende Massenverteilung dargestellt ohne die Verwendung des Vertexabstands.

Die zweite Messung, die hier beschrieben werden soll, befasst sich mit der Bestimmung von b-Quarks in Photoproduktionsereignissen. Zunächst wurde eine Vorauswahl von Ereignissen mit zwei Teilchenjets mit großem Transversalimpuls getroffen, wobei einer der Teilchenjets ein Myon enthält. Das Myon ist dabei ein Hinweis auf einen semileptonischen Zerfall eines b-Quarks in ein c-Quark. Aufgrund der großen Masse des b-Quarks erwartet man in solchen Ereignissen, dass, im Vergleich zu leichteren Quarks, der Transversalimpuls des Myons relativ zum assoziierten Jet, p_T^{rel} , zu hohen Werten verschoben ist. Das erlaubt eine statistische Separation der b-Quarks von den leichteren Quarks.

Auch hier kann man die Messgenauigkeit des Mikrovertexdetektors zur Anwendung bringen. Bei dieser Messung wird allerdings, anders als bei der zuvor beschriebenen, kein Sekundärvertex rekonstruiert. Man

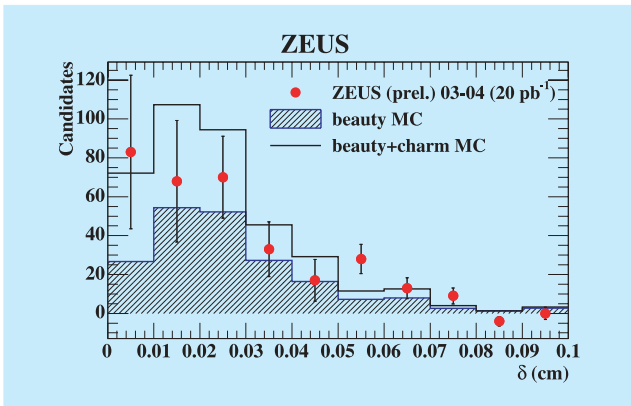


Abbildung 21: Verteilung des Stoßparameters δ von mit Jets assoziierten Myonen in Photoproduktionsergebnissen nach Subtraktion des negativen Anteils der Signifikanzverteilung. Die Punkte sind die vorläufigen Messdaten von ZEUS, das offene Histogramm zeigt die Erwartung für c - und b -Quark-Produktion und das schraffierte Histogramm zeigt die Erwartung für den b -Anteil.

verwendet hier den gemessenen Stoßparameter des assoziierten Myons, das heißt den transversalen Abstand des Perihels der Myonspur (der Punkt auf der Spur mit dem geringsten Abstand zum HERA Strahl). Dieser Abstand wird wiederum, wie zuvor beschrieben, in Form einer Signifikanz mit einem Vorzeichen dargestellt, wobei der negative Anteil der Verteilung die Abschätzung der Detektorauflösung ermöglicht.

Die Punkte in Abbildung 21 zeigen die Verteilung des Stoßparameters des assoziierten Myons nach Anwendung der statistischen Subtraktion im Bereich bis 0.1 cm. Ebenfalls dargestellt sind die Erwartungen für c und b (offenes Histogramm) und für b alleine (schraffiertes Histogramm). Allerdings sind die relativen Anteile von c und b aus der klassischen p_T^{rel} -Methode entnommen, da die noch relativ großen Fehler der Stoßparametermethode keine zuverlässige Extraktion dieser Anteile erlauben. Es handelt sich somit hier um keine eigenständige Messung, sondern lediglich um eine Überprüfung der Konsistenz.

In der Zukunft wird die Qualität dieser Ergebnisse noch stark gesteigert werden, insbesondere wenn die volle Präzision des Mikrovertexdetektors durch eine

entsprechende Kalibration vollständig ausgenutzt werden kann. Die Ergebnisse demonstrieren aber schon jetzt eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit dieser Erweiterung des ZEUS Detektors.

Prompte Photonen

Obwohl die QCD, die Theorie der starken Kraft, seit nun 25 Jahren etabliert ist, sind bisher nur sehr wenige exakte Vorhersagen bekannt. Insbesondere das Phänomen des „Confinement“, das heißt die Tatsache, dass wir in der Natur keine freien Quarks und Gluonen beobachten, entzieht sich weiterhin einer quantitativen Beschreibung. In der Praxis bedeutet das, dass wir Vorhersagen für die elementaren Reaktionen, in denen Quarks und Gluonen erzeugt werden, nur mit Messungen von Hadronen bzw. Teilchenjets überprüfen können. Für den Übergang von Quarks und Gluonen zu Hadronen gibt es eine Vielzahl verschiedener phänomenologischer Modelle. In Abhängigkeit vom untersuchten physikalischen Prozess sagen diese Modelle unterschiedlich große Korrekturen für die Hadronisation, also den Übergang von Quarks zu Hadronen, voraus. Ihre Vorhersagen sind in sorgfältiger Kleinarbeit über die Jahre immer weiter verbessert worden, so dass man daraus für viele Messungen einigermaßen verlässliche Korrekturen errechnen kann. Einen quantitativen Zugang zum Phänomen der Hadronisation gewinnt man dadurch aber leider nur sehr unzureichend.

Eine Möglichkeit, sozusagen durch eine Hintertür hindurch, die Eigenschaften der primären Quarks zu untersuchen, bietet allerdings ein Prozess, der im Berichtsjahr zum ersten Mal bei HERA nachgewiesen werden konnte. Dabei handelt es sich um die Abstrahlung eines hochenergetischen Photons direkt von einem der an der primären Reaktion beteiligten Quarks in tiefunelastischen Stoßprozessen. Man bezeichnet solche Photonen als prompte Photonen. Mit der Untersuchung der Eigenschaften dieser Photonen hat man sozusagen einen Durchgriff direkt auf die elementaren Reaktionsprodukte ohne von den Vorhersagen der Hadronisationsmodelle abhängig zu sein.

Diese Untersuchung bereitet allerdings beträchtliche experimentelle Schwierigkeiten, die sich daraus ergeben, dass in Teilchenreaktionen eine Vielzahl von

Photonen erzeugt werden, aus denen die sogenannten prompten Photonen herausgefiltert werden müssen. Insbesondere die neutralen Mesonen, π^0 und η , die beide in je zwei Photonen zerfallen, bereiten die größten Schwierigkeiten. Die beiden Photonen aus dem Zerfall der Mesonen liegen nämlich typischerweise im Detektor so dicht beieinander, dass sie zunächst als einzelnes Photon erkannt werden. Erst eine sorgfältige Analyse der Energiedepositionen im Kalorimeter erlaubt eine statistische Trennung der prompten Photonen vom Untergrund. Die hier diskutierte Messung basiert auf dem vollständigen Datensatz der Jahre 1996–2000 und entspricht einer integrierten Luminosität von 122 pb^{-1} . In einer Vorauswahl von tiefunelastischen Streueignissen mit Teilchenjets werden isolierte elektromagnetische Schauer anhand ihrer Ausdehnung und Form im Kalorimeter identifiziert.

Details dieser statistischen Trennung sind in Abbildung 22 dargestellt, die die Verteilung der Observablen $\langle \delta Z \rangle$, einem Maß für die Breite der elektromagnetischen Schauer, zeigt. Die Verteilung enthält drei lokale

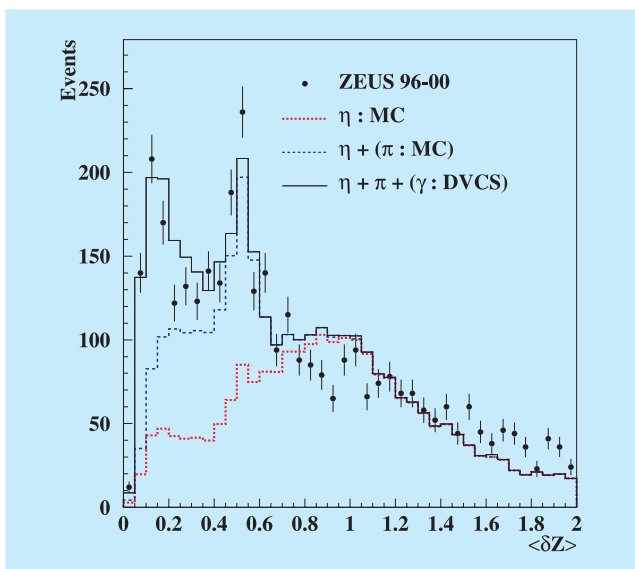


Abbildung 22: Verteilung der Breite elektromagnetischer Schauer, $\langle \delta Z \rangle$, im ZEUS Kalorimeter. Die Punkte stellen die ZEUS Daten dar. Die drei verschiedenen Histogramme entsprechen der statistischen Zerlegung mit Hilfe von Simulationen für die Photonen aus η und π^0 Zerfällen und wohl identifizierten Photonen aus „deep virtual compton scattering“ (DVCS) Ereignissen.

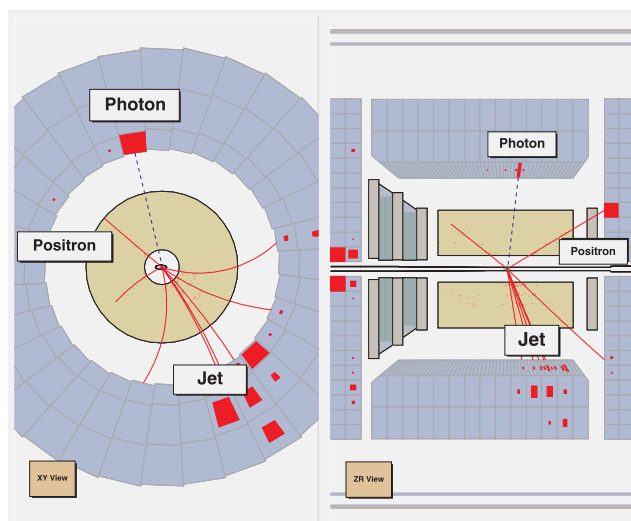


Abbildung 23: Tiefunelastisches Streueignis mit einem prompten Photon im ZEUS Detektor.

Maxima, die von den drei diskutierten Komponenten stammen. Die Photonenpaare aus den Zerfällen von η und π^0 Mesonen tragen typischerweise bei höheren Werten von $\langle \delta Z \rangle$ bei. Die einzelnen prompten Photonen sind als schmales Maximum bei niedrigen Werten von $\langle \delta Z \rangle$ zu sehen. Die Werte der einzelnen Beiträge werden durch statistische Anpassung einer Mischung der einzelnen Komponenten an Verteilungen wie diese errechnet. Ein Ereignis, das auf diese Weise extrahiert wurde ist in Abbildung 23 gezeigt.

Auf diese Weise wurden 572 Ereignisse über einem Untergrund von 1303 Ereignissen gefunden. Der sichtbare Wirkungsquerschnitt beträgt $\sigma(ep \rightarrow e\gamma X) = 5.64 \text{ pb}$ mit einem Fehler von etwa 10%. Damit ist die Existenz dieses Prozesses unzweifelhaft nachgewiesen und der Weg für weitere Untersuchungen an diesen interessanten Ereignissen gebahnt. Zukünftige Messungen mit höherer Statistik bei HERA II werden dann interessante neue Einblicke in den Hadronisationsprozess ermöglichen.

Pentaquarks

Nur zwei Arten von Quarkkombinationen sind notwendig, um alle bekannten stark wechselwirkenden Elementarteilchen zu erklären: Baryonen, bestehend aus

drei, und Mesonen, bestehend aus zwei Quarks. Beispiele für Mesonen sind das Pion und das η , die bereits im vorigen Abschnitt erwähnt wurden. Das Proton und das Neutron sind die bekanntesten Vertreter der Baryonen.

Mit diesem einfachen Konstruktionsprinzip werden alle der vielen hundert bekannten stark wechselwirkenden Elementarteilchen erfasst. Es könnte aber auch andere Kombinationen von Quarks und von Quarks mit Gluonen geben. Die Theorie der starken Wechselwirkung, die QCD, schließt andere Kombinationen nicht aus und in mehreren theoretischen Arbeiten werden die Eigenschaften dieser Teilchen vorhergesagt. Ein besonders interessanter Fall ist das Θ^+ , das aus zwei u -, zwei d -, und einem Anti- s -Quark bestehen soll. Damit wäre das Θ^+ das einfachste Pentaquark und außerdem ein „exotisches“ Baryon, weil es ein ungepaartes Antiquark enthält. Für das Θ^+ hatte bereits 1997 eine Gruppe von russischen Theoretikern eine Masse von 1530 MeV und eine schmale Zerfallsbreite vorhergesagt, die es ermöglichen sollte, das Teilchen zu beobachten.

Im Juli 2003 behaupteten zuerst Arbeitsgruppen aus Japan und USA, das Θ^+ beobachtet zu haben. Seitdem haben wenigstens 11 weitere Experimente weltweit diese Ergebnisse bestätigt. Auch das ZEUS Experiment hat im Berichtszeitraum einen Beitrag zum Verständnis dieses wichtigen Themas geleistet.

Bei ZEUS wurde speziell nach dem Zerfall dieses hypothetischen Teilchens in neutrale Kaonen und Protonen gesucht. Ein Teilchen, das in ein Proton und ein neutrales Kaon zerfällt, muss aus mindestens 5 Quarks bestehen. Allerdings muss man dafür die neutralen Kaonen von ihren Antiteilchen unterscheiden können. Bei ZEUS wurden die Kaonen mittels des Zerfalls in zwei geladene Pionen, $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, identifiziert. Die Protonauswahl wurde anhand der Energieverlustverteilung im zentralen Spurdetektor getroffen. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 24 gezeigt, in der die Verteilung der invarianten Masse der Kaon-Proton Kombinationen aufgetragen ist.

Deutlich ist eine resonanzähnliche Anhäufung von Ereignissen bei 1521 MeV über einem breiten Untergrund zu erkennen. An die Daten wurde eine Funktion bestehend aus einem Untergrundanteil und zwei Gaußkurven angepasst. Die breitere der beiden Gaußkurven liegt bei 1465 MeV und hat eine Breite von 16 MeV.

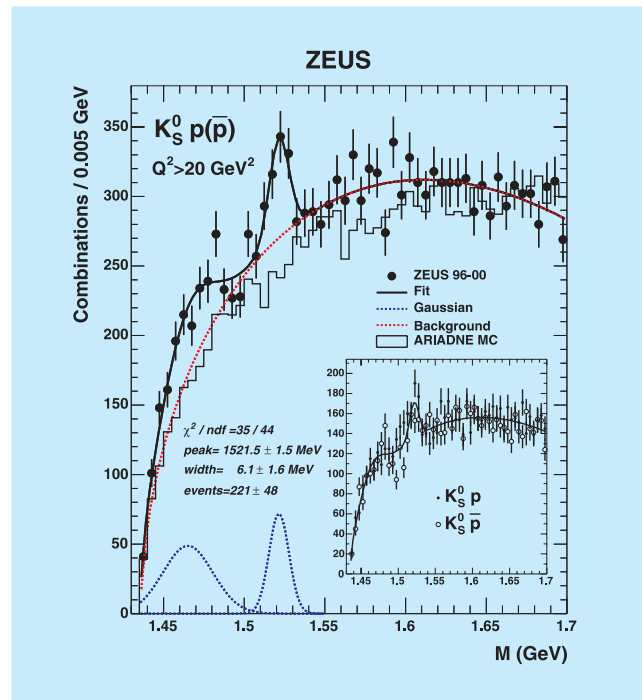


Abbildung 24: Invariante Massenverteilung der Kombinationen aus neutralen Kaonen und Protonen beziehungsweise Antiprotonen.

Dabei handelt es sich möglicherweise um das $\Sigma(1480)$, eine nicht gesicherte Resonanz. Die schmalere Gaußkurve liegt bei 1521 MeV, hat eine Breite von 8 ± 4 MeV und eine statistische Signifikanz von 3,9 Standardabweichungen. Die Position, Breite und der Zerfallskanal dieser Resonanz legen die Annahme nahe, dass es sich hierbei um das Θ^+ handeln könnte. Man muss allerdings einschränkend anmerken, dass in dieser Analyse die neutralen Kaonen nicht von ihren Antiteilchen unterschieden werden konnten. Die beobachtete Resonanz ist somit nicht zwingend exotisch. Außerdem liegt die Resonanz im Vergleich zu den anderen veröffentlichten Ergebnissen, die überwiegend zwischen 1530 und 1540 GeV zu finden sind, ein klein wenig zu niedrig. Klarheit wird vermutlich die Analyse weiterer Zerfallskanäle sowie die höhere Statistik der HERA II Daten bringen. Sollte es sich bei diesem Signal allerdings tatsächlich um das Θ^+ handeln, dann hätte ZEUS die erste Evidenz für das Antiteilchen des Θ^+ , nämlich das Θ^- , geliefert, wie das kleine eingefügte Diagramm in Abbildung 24 zeigt. Dort ist das Signal nämlich sowohl im Kanal $K_S^0 p$ als auch im Kanal $\bar{K}_S^0 \bar{p}$ zu sehen. Allerdings

wird hier noch einmal daran erinnert, dass zwischen K_S^0 und \bar{K}_S^0 in dieser Analyse nicht unterschieden werden kann.

Eine weitere mögliche Entdeckung sorgte im Berichtsjahr für Aufregung. Im März veröffentlichte die H1 Kollaboration die Beobachtung einer resonanz-artigen Struktur bei 3.1 GeV in Kombinationen eines $D^*(2010)$ Mesons mit einem Proton. Ein Objekt, das auf diese Weise zerfällt, müsste ebenfalls aus mindestens fünf Quarks bestehen, und zwar aus je zwei u-, zwei d- und einem Anti-c-Quark. Es wäre ein naher Verwandter des Θ^+ , bei dem das Anti-Strange-Quark durch ein Anti-c-Quark ersetzt ist und das man als Θ_C bezeichnet. Auch die Existenz dieses Pentaquarks wird in theoretischen Arbeiten vorhergesagt, allerdings mit einer Masse unter 3 GeV. Außer H1 hatte bisher kein anderes Experiment das Θ_C beobachtet. Somit war es von allerhöchster Wichtigkeit, auch in den Daten von ZEUS nach Hinweisen auf das Θ_C zu suchen. Die Methode, die bei ZEUS dafür verwendet wurde, und die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden präsentiert.

Der Ausgangspunkt sind Ereignisse, in denen ein $D^*(2010)$ Meson vorhanden ist. In den ZEUS Daten findet man ca. 40 000 dieser Mesonen. Wenn das Θ_C dort mit einem Anteil, vergleichbar dem von H1 angegebenen, vorhanden ist, dann müsste man an die 400 Θ_C bei ZEUS finden können. In diesen Ereignissen wurde dann nach Protonen und Antiprotonen gesucht und diese mit den $D^*(2010)$ Mesonen kombiniert.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 zu sehen. Dort werden vier verschiedene Fälle gezeigt. Diese unterscheiden sich im Zerfallskanal des $D^*(2010)$ und im kinematischen Bereich der untersuchten Daten. Diese Unterscheidung wurde vorgenommen, da das Θ_C bei H1 in verschiedenen kinematischen Bereichen unterschiedlich klar zu sehen ist. Außerdem wurden bei ZEUS auch die Ereignisse berücksichtigt, bei denen das $D^*(2010)$ in ein Kaon und drei Pionen zerfällt. H1 hat diesen Zerfallskanal bisher nicht betrachtet. Die in der Abbildung unterlegt dargestellte schmale Struktur zeigt die Größe des gemäss der H1 Beobachtung erwarteten Signals. In keinem der vier untersuchten Fälle konnte irgendein Hinweis auf ein Θ_C Signal von annähernd vergleichbarer Größe beobachtet werden. Aus der Tatsache, dass in den Daten von ZEUS nichts zu

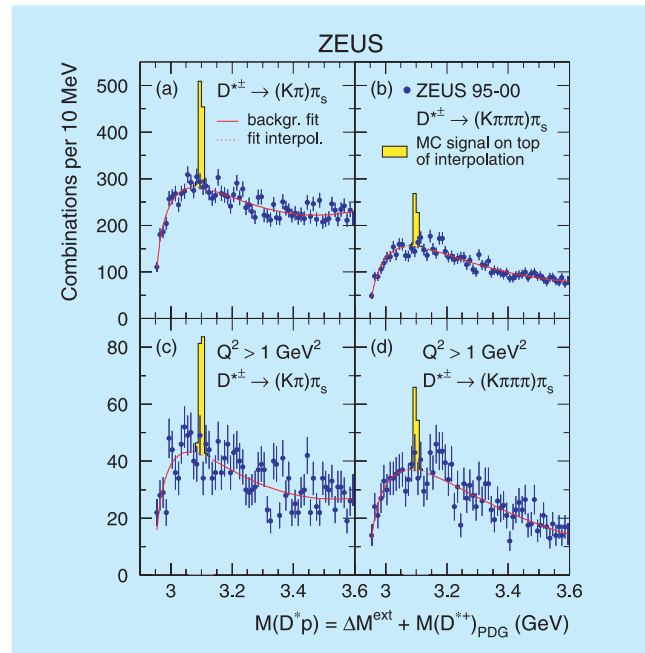


Abbildung 25: Invariante Massenverteilung der Kombinationen aus $D^*(2010)$ Mesonen mit Protonen beziehungsweise Antiprotonen.

sehen ist, wurde eine obere Schranke von 0.23% aller $D^*(2010)$ Mesonen für das maximal mögliche Θ_C Signal errechnet. Der von H1 angegebene Anteil des Θ_C Signals an allen Ereignissen mit einem $D^*(2010)$ beträgt dagegen 1%. Damit ist das Ergebnis von ZEUS mit dem von H1 klarerweise unverträglich.

Exklusive Produktion von J/ψ Mesonen

Seit seiner Entdeckung vor 30 Jahren im November 1974 spielt das J/ψ Meson eine wichtige Rolle für unser Verständnis der Physik der kleinsten Teilchen. Das J/ψ ist ein gebundener Zustand bestehend aus einem Charm- und einem Anti-Charm-Quark. Die Masse beträgt 3.1 GeV und die Zerfallsbreite ist extrem schmal. Die Entdeckung des J/ψ war der entscheidende experimentelle Schritt zum Verständnis des Quark Modells und eröffnete den Blick in die reichhaltige Welt der Charm-Mesonen. Insbesondere die Vermessung der

Teilchenspektren im Charm-Sektor lieferte die Verifikation der von Gell-Mann und Zweig vorgeschlagenen Theorie der starken Wechselwirkung.

Bei HERA erlaubt die exklusive Produktion von J/ψ Mesonen, ähnlich wie im Falle der Produktion von prompten Photonen, einen sehr direkten Rückschluss auf die elementaren Reaktionsprodukte in der Elektron-Proton Streuung. So kann man zusätzliche Informationen über die Gluonverteilung im Proton gewinnen.

Beispielhaft für diese Messungen sind in Abbildung 26 die Wirkungsquerschnitte für die Reaktion $ep \rightarrow epJ/\psi$ als Funktionen der invarianten Masse des Photon-Proton Systems, W , und der Virtualität des Photons, Q^2 , dargestellt. Man findet, dass diese Daten durch sehr einfache funktionale Zusammenhänge beschrieben werden, für die nur die Masse und der Spinzustand des J/ψ eine Rolle spielen. Die Ergebnisse sind außerdem mit den Messungen in der Photoproduktion konsistent. Somit kann man sagen, dass der Produktionsmechanismus des J/ψ wohlverstanden ist und die Methoden der perturbativen QCD Anwendung finden können. Sobald die notwendigen theoretischen Werkzeuge zur Verfügung stehen, wird es daher möglich sein, diese Daten zur Bestimmung der Gluonverteilung im Proton mit heranzuziehen.

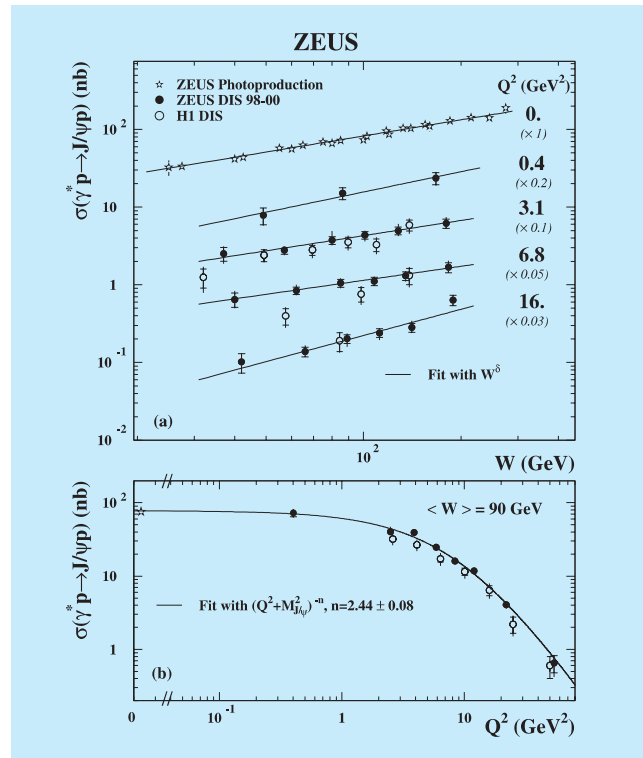


Abbildung 26: Wirkungsquerschnitt der Reaktion $ep \rightarrow epJ/\psi$ (a) als Funktion der invarianten Masse des Photon-Proton Systems, W , und (b) als Funktion der Virtualität des Photons, Q^2 .

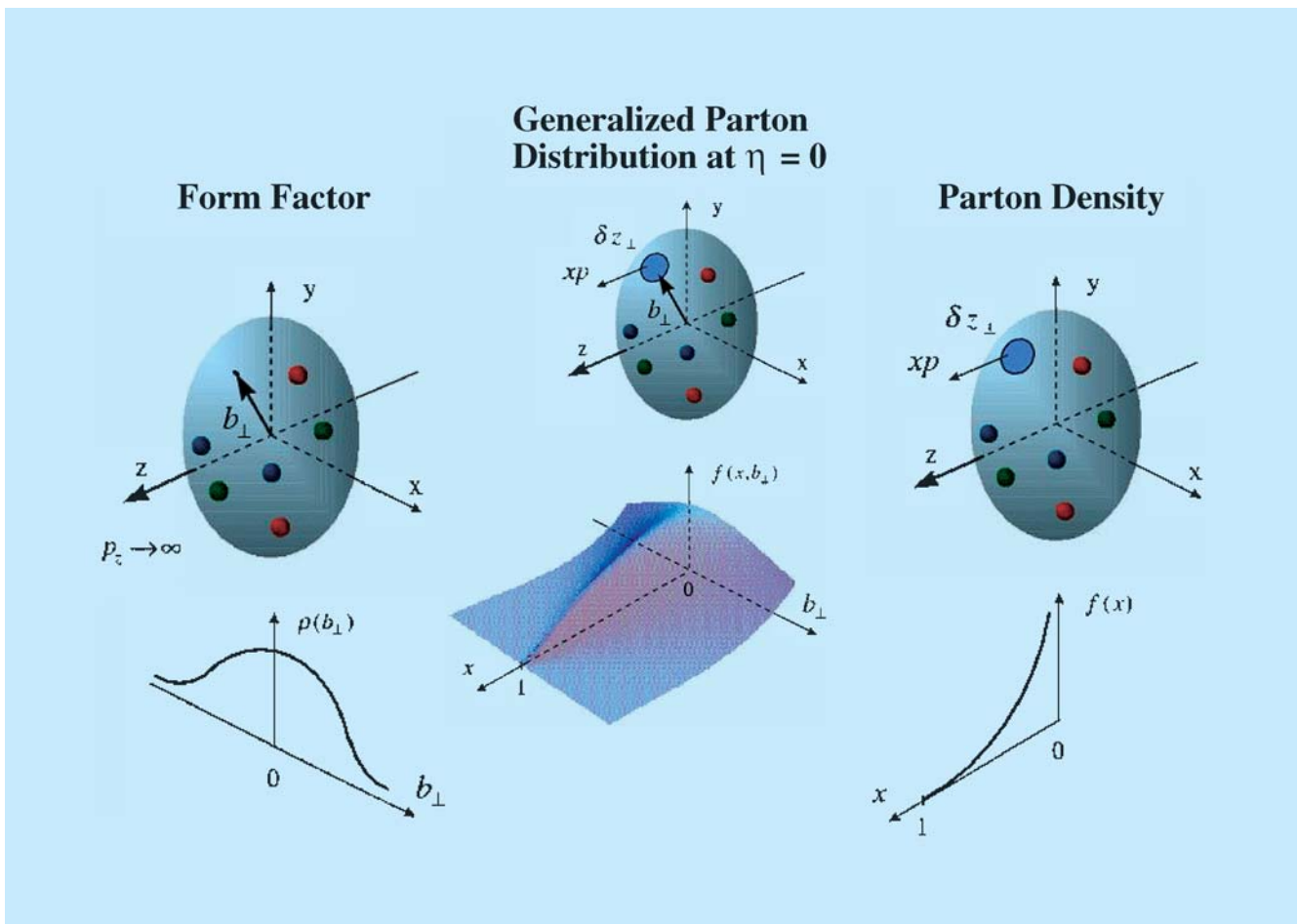


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Struktur der Generalisierten Parton Verteilungen.

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, JINR Dubna, 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

Sprecher: E.C. Aschenauer, DESY Zeuthen

Der Schwerpunkt der HERMES Datennahme lag in der Aufzeichnung von tiefinelastischen Streueignissen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Im Jahre 2004 konnte die Statistik solcher Ereignisse im Vergleich zur Datennahme 2002/03 verdreifacht werden. Diese Daten werden die Signifikanz der weltweit ersten Publikation von semi-inklusiven azimuthalen Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien von Pionen, produziert an einem transversal polarisierten Target, erheblich erhöhen. Bis zum Sommer 2005 werden diese Messungen weiterhin Schwerpunkt der HERMES-Datennahme sein.

Aus den bei HERMES in den Run-I aufgenommen polarisierten und unpolarisierten Wasserstoff- und Deuteriumdaten wurden weitere Ergebnisse extrahiert. So wurde unter Verwendung von Doppelspin-Asymmetrien, gemessen für inklusiv erzeugte Hadronen, erstmalig die Gluonpolarisation als Funktion des Transversalimpulses der Hadronen bestimmt.

Desweiteren wurden mit hoher Genauigkeit die Multiplizitäten von Pionen und Kaonen gemessen. Die Kombination der Hadronmultiplizitäten ermöglicht die Extraktion von Fragmentati-

onsfunktionen als Voraussetzung für die Bestimmung der polarisierten Quarkverteilungsfunktionen Δq in nächster Ordnung der QCD-Störungstheorie.

Ein weiterer Schwerpunkt in der Datenanalyse war die Fortführung der Untersuchungen von exklusiven Prozessen. Sie erlauben, wie bereits in vorherigen Jahresberichten beschrieben, die Bestimmung der generalisierten Partonverteilungen (GPD). Um ein vollständiges Bild zu erhalten, ist es wichtig, möglichst viele verschiedene exklusive Prozesse zu studieren. HERMES hat hierfür die Produktion von π^+ -Mesonen sowie von $\pi^+\pi^-$ -Mesonpaaren untersucht. Zudem wurden neue Ergebnisse für azimuthale Asymmetrien in der Produktion reeller Photonen (Tief-Virtuelle Compton Streuung) an einem Wasserstoff- und Deuteriumtarget extrahiert.

Um exklusive Prozesse noch genauer studieren zu können, wird das HERMES-Spektrometer durch einen Detektor zum Nachweis der langsamen Rückstoßprotonen erweitert. Exemplarisch für die verschiedenen Teststrahl-Studien der Einzelkomponenten des HERMES-Rückstoßdetektors werden die Ergebnisse für den Siliziumdetektor vorgestellt.

Physikalische Ergebnisse mit polarisierten Targets

Semi-inklusive azimuthale Einzelspin-Asymmetrien

Die Beschreibung der Nukleonstruktur erfolgt häufig durch Quarkverteilungsfunktionen. Diese Funktionen geben an, wieviele Quarks mit einem bestimmten Impulsbruchteil x und einer vorgegebenen Spinausrichtung im Nukleon vorgefunden werden. Die Theorie der starken Wechselwirkung verlangt dabei nach drei fundamentalen Quarkverteilungen, von denen zwei – die unpolarisierte Quarkverteilung und die Helizitätsverteilung – schon in verschiedenen Experimenten gemessen wurden. Die verbleibende *Transversity*-Verteilung, die Differenz der Anzahl von 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, entzog sich bisher jeglichen Messversuchen. Dies verdankt sie ihrem Verhalten unter Chiralitätstransformationen: *Transversity* ist chiral-ungerade. Chiralität ist in harten

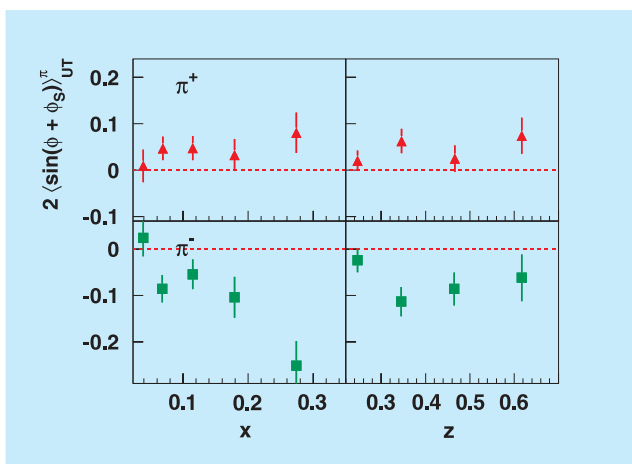


Abbildung 28: HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusive azimuthalen Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien von geladenen Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im sogenannten Collinswinkel, welche proportional zur *Transversity*-Verteilung sind.

Streuprozessen jedoch eine Erhaltungsgröße, weswegen die *Transversity*-Verteilung in solchen Prozessen zu anderen chiral-ungeraden Größen, z. B. Fragmentationsfunktionen, gekoppelt werden muss.

Verschiedene chiral-ungerade Fragmentationsfunktionen können verwendet werden, um die *Transversity*-Verteilung zu messen. Sie haben jedoch alle gemeinsam, dass sie bisher noch nicht direkt nachgewiesen wurden. Die Collins Fragmentationsfunktion ist ein Beispiel. Sie verursacht eine asymmetrische Verteilung der produzierten Hadronen, wenn sie von einem transversal polarisierten Quark stammen. Eine andere Möglichkeit bietet das Studium von Hadronpaaren. Die Interferenz von Hadronpaaren in unterschiedlichen Drehimpulszuständen wird durch Interferenzfragmentationsfunktionen beschrieben. Auch sie verursachen spinabhängige azimuthale Asymmetrien, diesmal jedoch in der Ausrichtung der Ebene, die durch die beiden produzierten Hadronen aufgespannt wird.

Ein bedeutender Unterschied zwischen den beiden genannten Fragmentationsfunktionen ist, dass die Collins Fragmentationsfunktion zur Klasse der transversalimpuls-abhängigen Funktionen gehört. Diese Funktionen hängen, im Gegensatz zu z. B. eingangs erwähnten Quarkverteilungen, explizit vom transversalen Impuls der Quarks ab. Integriert man über diesen Impuls, verschwinden die meisten der Funktionen und es

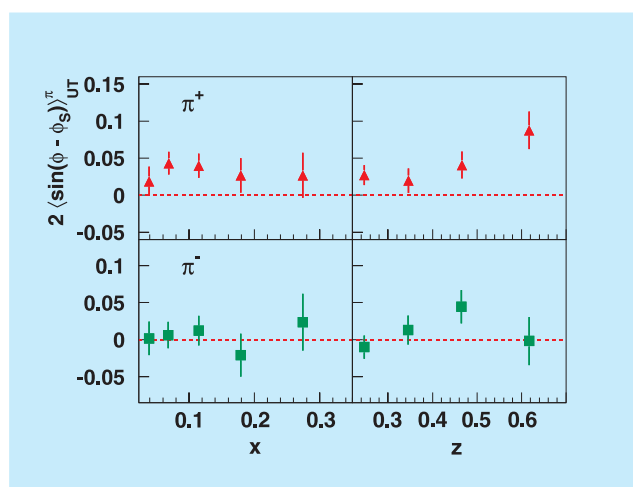


Abbildung 29: HERMES-Ergebnisse zu den Siversasymmetrien für geladene Pionen von einem transversal polarisiertem Wasserstofftarget.

bleiben, im Falle der Quarkverteilungen, nur die drei obigen Quarkverteilungen übrig. Die zusätzliche Komplexität, die man durch die explizite Abhängigkeit vom Transversalimpuls erhält, erlaubt aber auch neue, bisher unerwartete Effekte. Die Siversfunktion z. B. beschreibt die Verteilung unpolarisierter Quarks in transversal polarisierten Nukleonen. Sie ist ungerade unter Zeitumkehr, was bisher als verboten angesehen war. In semi-inklusiven tiefunelastischen Streuprozessen führt sie, ähnlich der Collins Fragmentationsfunktion, zu einer asymmetrischen Verteilung der produzierten Hadronen – diesmal aber bzgl. des transversalen Spins des Nukleons.

Im ersten Datennahmejahr mit einem transversal polarisierten Wasserstofftarget wurden genügend Streueignisse registriert, um einen ersten Blick auf die Collins- und Siversasymmetrien zu werfen. Diese semi-inklusiven Wirkungsquerschnitt-Asymmetrien in der azimuthalen Verteilung von geladenen Pionen sind in den Abbildungen 28 und 29 als Funktionen des Impulsbruchteils x und des Energiebruchteils z vom virtuellen Photon, welchen das produziert Pion besitzt, zu sehen. Sie sind die weltweit ersten Ergebnisse dieser Art. Die nicht verschwindenden Collinsasymmetrien geben Hoffnung, dass man mit mehr Daten auf diesem Weg Zugang zur *Transversity*-Verteilung erlangt.

Ebenso bedeutend ist die erste Messung der Siversasymmetrie. Sie zeigt, dass zeitumkehr-ungerade Quarkverteilungsfunktionen tatsächlich existieren. Jedoch ist bei dieser Interpretation zu beachten, dass bei solch kleinen Asymmetrien wie den Siversasymmetrien Beiträge von anderen Prozessen auch eine Rolle spielen können. Ein Bruchteil der detektierten Pionen stammt in der Tat vom Zerfall exklusiv produzierter Vektormesonen, deren azimuthale Asymmetrie nicht bekannt ist. Für deren Bestimmung sind zusätzliche Daten nötig, wie sie z. Zt. bei HERMES genommen werden.

Ein anderer Zugang zur *Transversity*-Verteilung ist über die Interferenzfragmentation. Obwohl die Daten an einem transversal polarisierten Target dafür noch nicht ausreichend waren, hat HERMES erste vorläufige Ergebnisse zur Interferenzfragmentation vorgelegt, diese jedoch von longitudinal polarisiertem Deuterium. Die azimuthale Einzelspin-Asymmetrie, die durch Interferenzfragmentation hervorgerufen wird, ist in Abbildung 30 zu sehen. Sie ist verträglich mit Null, was jedoch kein schlechtes Zeichen für deren Verwendung

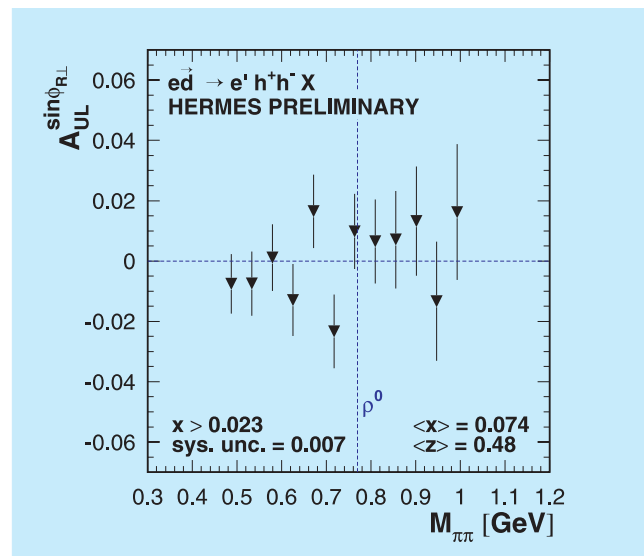


Abbildung 30: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu den semi-inklusiven azimuthalen Wirkungsquerschnitt-Asymmetrien der 2-Hadron-Ebene mit einem longitudinal polarisiertem Deuteriumtarget als Funktion der invarianten Masse des Hadronenpaares.

im Fall eines transversal polarisierten Target sein muss, da sie im longitudinalen Fall stark unterdrückt ist.

Wann immer man Messungen an einem Target vornimmt, welches bzgl. der Strahlrichtung polarisiert ist, muss man die verschiedenen Polarisationskomponenten entlang der Impulsachse des virtuellen Photons beachten. So hat man bei einem longitudinal polarisierten Target eine Polarisationskomponente, die transversal zum virtuellen Photon ist. Gemessene Asymmetrien enthalten daher Beiträge von beiden Polarisationskomponenten, den Komponenten longitudinal und transversal zum virtuellen Photon. Eine Entflechtung beider Beiträge ist durch Daten von longitudinal und transversal zur Strahlrichtung polarisierten Targets möglich. HERMES Daten von longitudinal und transversal polarisiertem Wasserstoff wurden vereint, um die rein longitudinalen Einzelspin-Asymmetrien in der Verteilung von semi-inklusiven Pionen zu bestimmen. Vorläufige Ergebnisse (siehe Abb. 31) zeigen, dass die Asymmetrien an longitudinal zur Strahlrichtung polarisiertem Wasserstoff vom Beitrag der longitudinalen Komponente bzgl. der Photonrichtung dominiert wird. Dies war nicht unbedingt erwartet worden, da dieser Beitrag im Wirkungsquerschnitt unterdrückt ist.

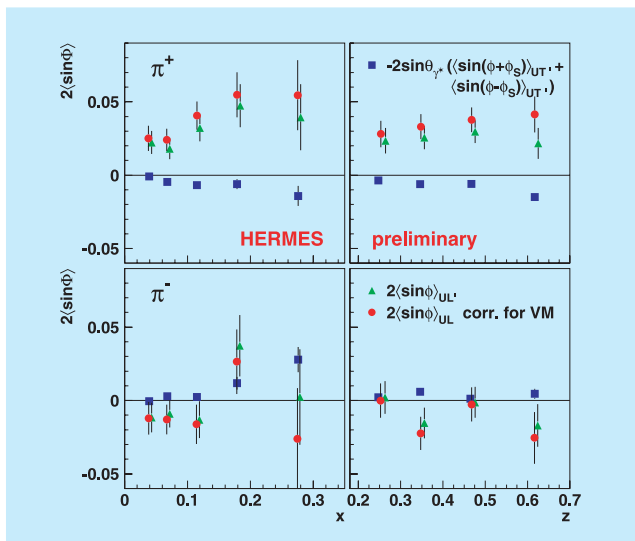


Abbildung 31: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu den einzelnen Beiträgen (Kreise und Quadrate) zu den azimuthalen Wirkungsquerschnitt-Asymmetrien (Dreiecke) von der zum Photon transversalen und longitudinalen Polarisationskomponenten eines zur Strahlrichtung longitudinal polarisiertem Wasserstofftarget. Die Ergebnisse für geladene Teilchen sind als Funktion von x und z dargestellt. Der im Wirkungsquerschnitt unterdrückte Beitrag von der longitudinalen Komponente (Kreise) dominiert in den gemessenen Asymmetrien.

Bestimmung der Gluon-Polarisation

Ein wesentliches ungelöstes Problem der heutigen Hadronphysik besteht darin, dass die Zusammensetzung des Gesamt-Drehimpulses von Nukleonen aus denjenigen seiner partonischen Bestandteile bisher nur zu einem kleinem Teil bekannt ist. Im HERMES-Experiment wurden Doppelspin-Asymmetrien gemessen im Wirkungsquerschnitt inklusiver Hadronen, z. B. π^\pm , K^\pm . Ein Bruchteil dieser Teilchen wird erzeugt durch Wechselwirkung des vom Strahlteilchen (e^\pm) abgestrahlten virtuellen Photons (γ^*) mit einem Gluon (g) im Nukleon und nicht, wie in den meisten Fällen, einem Quark (q). Im Rahmen eines QCD-basierten Quark-Parton-Modells bietet diese Reaktion die Möglichkeit, den Anteil der Gluonen am Gesamt-Spin des Nukleons ($\Delta G/G$) zu ermitteln. Insbesondere werden Hadronen gebraucht, die mit möglichst hohem Transversalimpuls

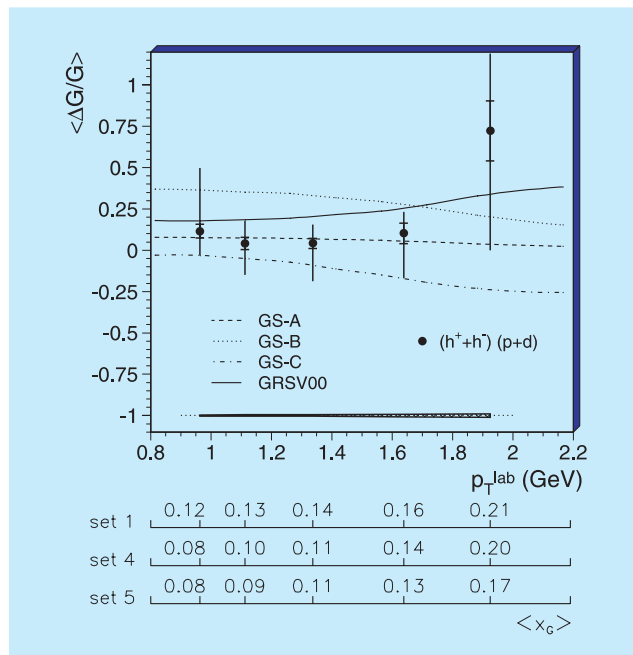


Abbildung 32: Vorläufige HERMES-Ergebnisse der polarisierten Gluonverteilung als Funktion des Transversalimpulses. Die Kurven zeigen Vorhersagen aus verschiedene QCD Analysen der polarisierten Strukturfunktion g_1 . Die unteren Skalen zeigen die Entsprechung des gemessenen Transversalimpulses zum x -Wert des Gluons für unterschiedliche Modellannahmen.

(p_T^{lab}) erzeugt worden sind, weil dieser bevorzugt bei der harten γ^* g -Streuung entsteht. Der o. g. Bruchteil ist a priori unbekannt und muss in einer Monte Carlo Simulation ermittelt werden. Bei der relativ niedrigen Energie, die im HERMES-Experiment zur Verfügung steht, sind die verschiedenen, dabei zu modellierenden Prozesse nicht genügend genau bekannt. Diese Ungenauigkeit stellt den Hauptanteil des systematischen Fehlers der Messung dar, welcher erstmalig überhaupt im Rahmen einer Doktorarbeit ermittelt werden konnte. Die in Abbildung 32 gezeigten Messpunkte zeigen weltweit erstmalig, wie $(\Delta G/G)$ von p_T^{lab} abhängt. Der innere Bereich des Fehlerbalkens zeigt die statistische Ungenauigkeit, der gesamte Balken die kombinierte statistische und systematische Ungenauigkeit. Die unteren Skalen zeigen, wie die p_T^{lab} -Abhängigkeit übersetzt werden kann, wenn auch nur im Sinne von Mittelwerten von jeweils breiten Verteilungen, in eine Abhängigkeit vom Anteil x_G des Gluons am Gesamtimpuls des Nukleons. Diese Skalen variieren leicht für verschiedene

Modellversionen und demonstrieren einen Teil der Modellabhängigkeit der Analyse. Die Kurven in der Abbildung zeigen die Ergebnisse von QCD-Analysen inklusiver Daten. Deren relative Variation repräsentiert den Stand der Unkenntnis der jetzt gemessenen Observablen $\Delta G/G$. Die HERMES-Ergebnisse sind mit den bisherigen Vorhersagen verträglich.

Physikalische Ergebnisse mit unpolarisierten Targets

Ladungsseparierte Hadronmultiplizitäten

Die Fragmentation eines Quarks, das das Nukleon verlässt, in ein oder mehrere Hadronen ist ein langreichweitiger Prozess und lässt sich damit nicht störungstheoretisch berechnen. Stattdessen wird der Vorgang durch sogenannte Fragmentationsfunktionen parametrisiert. Die Funktion D_q^h beschreibt die mittlere Anzahl der Hadronen des Typs h , die bei Streuung an einem Quark der Sorte q erzeugt werden. Die experimentelle Grundlage zur Analyse der Fragmentationsfunktionen bildet die Extraktion von Hadronmultiplizitäten

$$\frac{1}{N^{\text{DIS}}} \frac{dN^h}{dz} = \frac{\sum_f e_f^2 \int_0^1 dx q_f(x, Q^2) D_f^h(z, Q^2)}{\sum_f e_f^2 \int_0^1 dx q_f(x, Q^2)},$$

die die Verbindung der Fragmentationsfunktionen, der Quarkverteilungsfunktionen $q_f(x, Q^2)$ sowie der Lepton-Quark-Wechselwirkung darstellen. Die Observable z steht dabei für den Anteil der Hadronenergie E_h an der insgesamt verfügbaren (Photonen-)Energie ν .

Bereits im Jahre 1999 wurden von HERMES Ergebnisse über die Fragmentation von geladenen und neutralen Pionen aus der Positronstreuung am Wasserstofftarget vorgestellt. Die jetzt vorliegenden neuen Ergebnisse stellen in verschiedenen Bereichen einen signifikanten Fortschritt da. Zum einen stand mit den HERMES-Daten des Jahres 2000 ein Datensatz hoher Statistik zur Verfügung, der durch die Verwendung des RICH-Detektors (Ring-Imaging Čerenkov Detektor) erstmals die Separation der Hadronen in Pionen, Kaonen und Protonen ermöglichte.

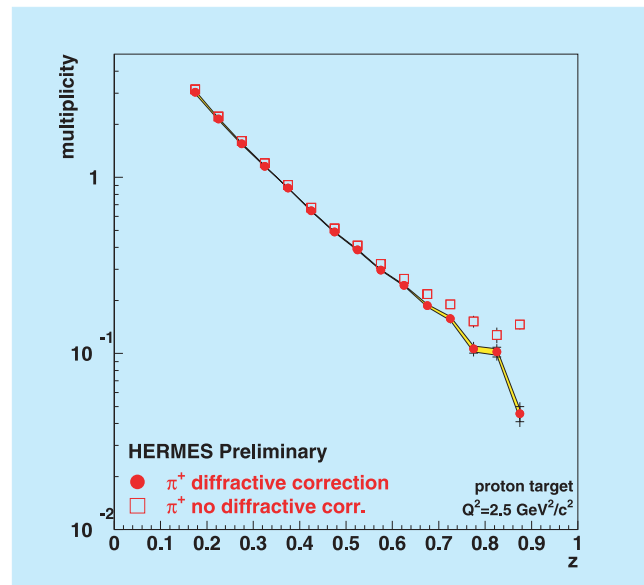


Abbildung 33: Vorläufige HERMES-Ergebnisse der Multiplizitäten von positiven Pionen als Funktion von z . Dargestellt sind die Ergebnisse mit und ohne Korrektur für diffraktive Prozesse.

Zum Anderen konnte die Analysemethode verbessert werden. So kam zur Korrektur von Akzeptanzeffekten und von Einflüssen durch Strahlungsprozesse eine verbesserte Methode zur Anwendung. Berücksichtigt wurden auch erstmals Korrekturen für Hadronen, die durch diffraktive Prozesse erzeugt wurden. Ein Beispiel hierfür sind Pionen, die durch den Zerfall des ρ^0 -Vektormesons entstehen. In beiden Fällen profitierte die Analyse von Verbesserungen der Monte Carlo-Simulationen in den letzten Jahren.

Abbildung 33 zeigt die Multiplizität positiver Pionen als Funktion von z . Deutlich ist der Einfluss diffraktiver Prozesse bei hohem z zu beobachten. Grund hierfür ist der nicht symmetrische Zerfall $\rho^0 \rightarrow 2\pi$, der zur Konzentration der entstehenden Pionen bei kleinem und hohem z führt, wobei sie bei letzterem einen hohen Anteil an der Gesamtstatistik bilden. Für Kaonen (Abb. 34) trägt der Zerfall des ϕ -Vektormesons nur unwesentlich zur Gesamtstatistik bei.

Das Band markiert den systematischen Fehlerbereich, der durch die Korrektur für Fehlidentifikationen des RICH-Detektors zustande kommt. Der insbesondere für Kaonen (Abb. 34) signifikante Fehlerbereich wird sich

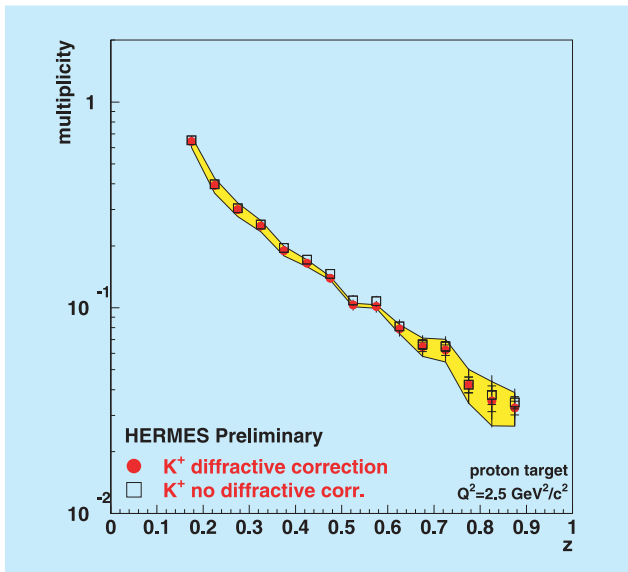


Abbildung 34: Vorläufige HERMES-Ergebnisse der Multiplizitäten von positive Kaonen als Funktion von z .

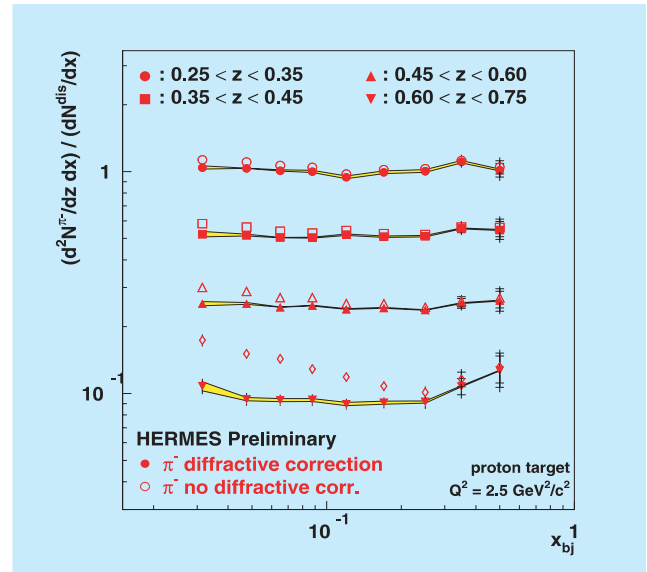


Abbildung 35: Vorläufige HERMES-Ergebnisse der Multiplizitäten von negativen Pionen als Funktion von x_{Bj} in 4 verschiedenen z Bins.

durch ein besseres Verständnis der Systematik noch verringern lassen.

Neben der z -Abhängigkeit der Multiplizitäten wurde auch ihr Verlauf als Funktion der Variablen x_{Bj} und Q^2 untersucht. Abbildung 35 zeigt die weitgehende Unabhängigkeit der Multiplizität geladener Pionen von x_{Bj} . Dies ist in Einklang mit der Theorie, dass der Fragmentationsprozess und der vorausgehende Streuprozess faktorisieren. Die gezeigten HERMES-Daten wurden zu $Q^2 = 2.5 \text{ GeV}^2$ entwickelt.

Die gewonnenen Informationen werden derzeit durch eine Analyse der Streudaten an einem Deuteriumtarget vervollständigt. Durch die Kombination der Ergebnisse sollen Fragmentationsfunktionen extrahiert werden. Diese sind Voraussetzung für die Bestimmung der polarisierten Quarkverteilungsfunktionen Δq in nächster Ordnung der QCD-Störungstheorie.

Exklusive Prozesse

Seit einigen Jahren existiert ein neuer vereinheitlichter Formalismus zur kohärenten Beschreibung der Struktur der Hadronen im Rahmen der Quantenfeld-

theorie. Dieser Formalismus führt die so genannten Generalisierten Partonverteilungen (Generalised Parton Distribution – GPD) ein. Die herkömmlichen Partonverteilungen und die Formfaktoren ergeben sich aus den kinematischen Limits bzw. aus den Momenten der GPDs. Eine der interessantesten Perspektiven des GPD Formalismus ist die bisher einzige Beschreibung zur Messung des Bahndrehimpulses der Quarks im Nukleon. Jüngste theoretische Entwicklungen betonen das Potential der GPDs, die dreidimensionale Struktur von Hadronen durch die Bestimmung der Korrelation von transversaler Position und longitudinalem Impuls zu untersuchen. GPDs können in harten Streuprozessen gemessen werden in denen Mesonen oder reale Photonen (Tiefvirtuelle Compton-Streuung – DVCS) ohne Fragmentation des rückwärts gestreuten Nukleons erzeugt werden.

Die verschiedenen Prozesse erlauben den Zugang zu unterschiedlichen GPDs. Exklusive Vektormesonproduktion ist sensitiv auf die unpolarisierten GPDs, die exklusive Produktion pseudoskalarer Mesonen dagegen auf die polarisierten GPDs. Der direkte Zugang zu den neuen Funktionen ergibt sich aus der Messung der Tiefvirtuellen Compton-Streuung. Die multidimensionale Struktur der GPDs (sie sind Funktionen von drei

kinematischen Variablen und zusätzlich von der Photonvirtualität Q^2) kompliziert ihre Entfaltung aus den gemessenen Observablen. Das Studium unterschiedlicher Prozesse und eine globale Analyse aller verfügbaren Daten ist daher notwendig, um die Generalisierten Partonverteilungen zu bestimmen.

Die Messung exklusiver Prozesse ist experimentell äußerst anspruchsvoll aufgrund der gleichzeitigen Anforderungen von hoher Luminosität (aufgrund der niedrigen Wirkungsquerschnitte), hoher Auflösung (zur Trennung der exklusiven Prozesse von den semi-inklusiven mit Fragmentation) und hoher Strahlenergie (zur Sicherstellung der Faktorisierung).

HERMES hat bereits erste Ergebnisse der Messung exklusiver Mesonproduktion und von DVCS Prozessen vorgestellt. Bisher konnte das rückwärts gestreute Nukleon nicht nachgewiesen werden und die Exklusivität des Ereignisses wird durch die Forderung einer Entsprechung der rekonstruierten fehlenden Masse und der Nukleonmasse (*missing mass technique*) sichergestellt.

Nachfolgend werden einige neue HERMES Ergebnisse der exklusiven Produktion von Pionen sowie von DVCS Prozessen vorgestellt.

Exklusive Meson Produktion

Wirkungsquerschnitt der exklusiven π^+ -Produktion

Die Faktorisierung exklusiver Prozesse mit Mesonen im Endzustand konnte bisher nur für longitudinale virtuelle Photonen formell bewiesen werden. Um solche Messungen mit Modellrechnungen vergleichen zu können, sollten daher die Beiträge longitudinaler (σ_L) und transversaler (σ_T) virtueller Photonen zum Wirkungsquerschnitt (σ_{tot})

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_T + \epsilon \sigma_L$$

getrennt werden (ϵ ist der Parameter der virtuellen Photonpolarisation, der maximal 1 sein kann). Während in Prozessen mit Vektormesonen im Endzustand die Winkelverteilung ihrer Zerfallsprodukte die Separation dieser beiden Beiträge erlaubt, müssen im Falle

der Produktion pseudoskalarer Mesonen die Wirkungsquerschnitte bei unterschiedlichen Strahlenergien gemessen werden (Rosenbluth-Separation). Letzteres ist bei HERMES nicht möglich. Im Rahmen des Beweises der Faktorisierung konnte allerdings gezeigt werden, dass σ_T um die Größenordnung $1/Q^2$ gegenüber σ_L unterdrückt ist und letzterer folglich bei hohen Photonvirtualitäten Q^2 den Wirkungsquerschnitt dominiert. Die Überprüfung der Q^2 -Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts ist daher essentiell für die Interpretation der Ergebnisse und gibt Aufschluss über die Dominanz des longitudinalen Beitrages.

Eines der jüngsten Ergebnisse des HERMES Experimentes ist die Messung des Wirkungsquerschnitts der exklusiven π^+ -Produktion an einem Wasserstofftarget bei hohen Photonvirtualitäten $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$. Der Wirkungsquerschnitt dieses Prozesses ist durch den sogenannten Pion-Pol dominiert der durch den Pion-Formfaktor parametrisiert wird. Die Messung der Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts vom Energie-Impulsübertrag auf das Nukleon t und die Extrapolation $t \rightarrow 0$ ermöglicht die Bestimmung des Pion-Formfaktors bei bisher ungemessenen hohen Werten von Q^2 .

Der exklusive Kanal der π^+ -Produktion wird durch den Nachweis des gestreuten Leptons und des erzeugten π^+ -Mesons sowie die Forderung nach einer Entsprechung der rekonstruierten fehlenden Masse und der Masse des Targetnukleons ausgewählt. Als Abschätzung für den nicht-exklusiven Untergrund wurde die Verteilung der π^- -Mesonen, normiert auf die π^+ -Mesonverteilung, im Bereich der fehlenden Masse die der Nukleonmasse entspricht verwendet. Die kinematischen Verteilungen der exklusiven Ereignisse (in Q^2 , x , t) stimmen mit Monte-Carlo Simulationen überein, die auf einem Modell für die Generalisierten Parton Verteilungen basieren. Abbildung 36 zeigt einen Vergleich der Verteilung des Energie-Impulsübertrages zum Nukleon t aus Monte-Carlo Simulationen mit den Daten. Die Simulationen ermöglichen die Bestimmung der Effizienzen und der Akzeptanzkorrektur des exklusiven Prozesses.

Der extrahierte Wirkungsquerschnitt der exklusiven π^+ -Produktion an einem Wasserstofftarget $ep \rightarrow e\pi^+$ ist in Abbildung 37 als Funktion der Photonvirtualität Q^2 für drei verschiedene x -Bereiche dargestellt.

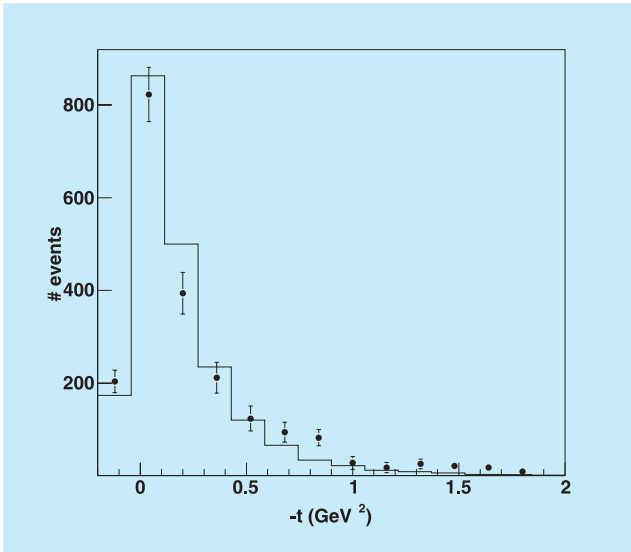


Abbildung 36: Verteilung des Energie-Impulsübertrages auf das Nukleon t aus Monte-Carlo Simulationen (Histogramm) mit den Daten (Punkte) für die exklusive π^+ -Produktion an einem Wasserstofftarget.

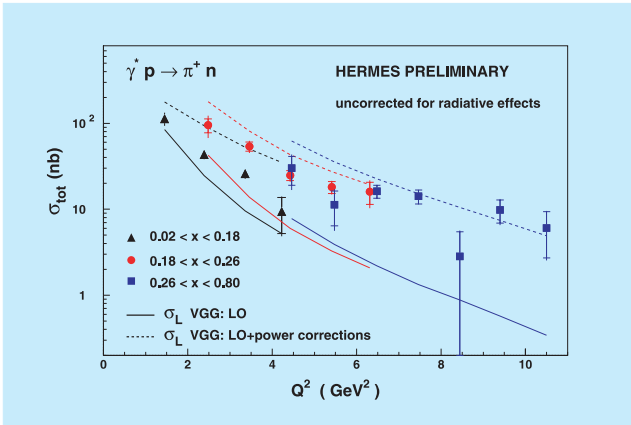


Abbildung 37: Vorläufige HERMES-Ergebnisse für den Wirkungsquerschnitt des Prozesses $ep \rightarrow en\pi^+$ als Funktion von Q^2 für drei verschiedene x -Bereiche. Die Kurven zeigen Rechnungen basierend auf einem Modell für die GPDs.

Die Ergebnisse werden verglichen mit Rechnungen für den Beitrag longitudinaler virtueller Photonen zum Wirkungsquerschnitt, basierend auf einem Modell für die Generalisierten Partonverteilungen. Die durchgezogenen Kurven zeigen die Berechnungen in führender Ordnung QCD (Leading Order – LO) während die gestrich-

chen Kurven Rechnungen unter zusätzlicher Berücksichtigung von Korrekturen höherer Ordnung (*power corrections*) aufgrund der intrinsischen transversalen Impulse der Partonen im Nukleon und der Beiträge zur Pionproduktion durch den Überlagerungsbereich von Meson und Nukleon (*soft overlap*) darstellen. Während die Rechnungen in führender Ordnung den gemessenen Wirkungsquerschnitt unterschätzen, erscheinen die unter Berücksichtigung der *power corrections* erhaltenen Kurven deutlich zu hoch. Ein sehr wichtiges Ergebnis ist allerdings dass die Q^2 -Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts mit der für σ_L erwarteten generell übereinstimmt. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Beitrag longitudinaler virtueller Photonen dominiert, was Rückschlüsse auf die Modellierung der GPDs erlaubt.

Die gegenwärtig laufende Analyse der Daten berücksichtigt Strahlungskorrekturen zum gemessenen Wirkungsquerschnitt, welche einen Effekt von etwa 20–25% darstellen, und legt Augenmerk auf die Bestimmung seiner Abhängigkeit vom Energie-Impuls-Übertrag t auf das Proton. Die gemessene t -Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes erlaubt die Bestimmung des Pion-Formfaktors welcher für höhere Werte von Q^2 noch völlig unbekannt ist.

Exklusive $\pi^+\pi^-$ -Paarproduktion

HERMES hat mit der Messung exklusiver $\pi^+\pi^-$ -Paarproduktion eine weitere interessante Observable untersucht, die Informationen über die Generalisierten Parton Verteilungen enthält. Die Wechselwirkung des virtuellen Photons mit dem Targetnukleon erfolgt hierbei über die Abstrahlung und nachfolgende Absorption eines Quarks (Quark-Austauschmechanismus) oder Gluons (2-Gluon-Austauschmechanismus). Aus der Wechselwirkung der erzeugten Partonen entsteht entweder direkt das $\pi^+\pi^-$ -Paar oder ein instabiles Teilchen (Resonanz), welches anschließend in zwei Pionen zerfällt. Die unterschiedlichen Produktionsmechanismen sind durch verschiedene mögliche Werte des Gesamtdrehimpulses J des Pionpaares charakterisiert. Während der Quark-Austauschmechanismus Pionpaare mit geraden ($J = 0, 2, \dots$) und ungeraden ($J = 1, 3, \dots$) Werten des Gesamtdrehimpulses erzeugt, führt der Gluon-Austauschmechanismus ausschließlich zu Pionpaaren mit ungeraden Werten J .

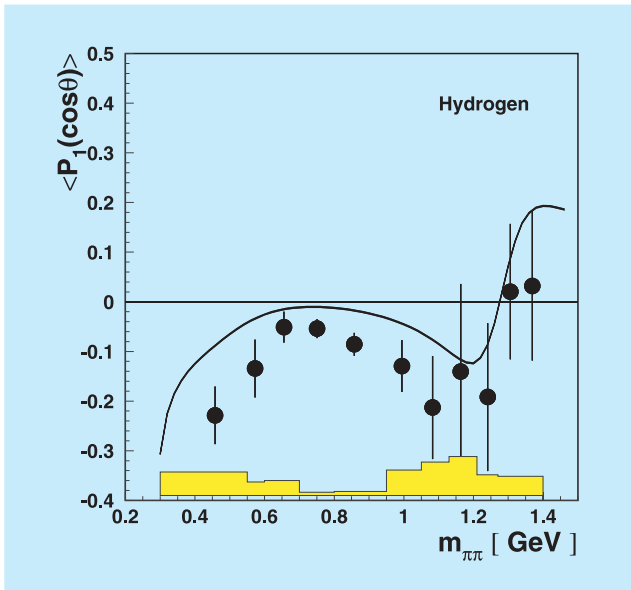


Abbildung 38: HERMES-Ergebnisse für das erste Legendre-Moment als Funktion der invarianten Masse des Pionpaares für die exklusive $\pi^+\pi^-$ -Paarproduktion an einem Wasserstofftarget. Die Kurve zeigt Berechnungen basierend auf einem Modell für GPDs.

Der dominante Produktionsmechanismus ist dabei der P-Wellen-Zustand des Pionpaares mit $J = 1$. Um trotz des dominanten Prozesses die unterschiedlichen Produktionsmechanismen studieren zu können, wurde eine Observable identifiziert, die auf die Interferenz der beiden Prozesse sensitiv ist. Zu diesem Zweck wurden die Legendre-Momente $\langle P_n(\cos\theta) \rangle$ gemessen, welche das Integral n-ter Ordnung der Legendre-Polynome $P_n(\cos\theta)$, gewichtet mit dem differentiellen Wirkungsquerschnitt $d\sigma^{\pi^+\pi^-}/d\cos\theta$ darstellen. Hierbei ist θ ein bestimmter Streuwinkel des π^+ -Mesons. Abbildung 38 zeigt das erste Moment $\langle P_1 \rangle$, welches auf die Interferenz zwischen P-Wellen und S- bzw. D-Wellen ($J = 0$ bzw. $J = 2$) sensitiv ist, als Funktion der invarianten Masse des exklusiv erzeugten Pionpaares $m_{\pi\pi}$.

Die starke Variation von $\langle P_1 \rangle$ für verschiedene Werte $m_{\pi\pi}$ kann als Signal der Interferenz zwischen den verschiedenen Zuständen interpretiert werden: die ρ -Resonanz mit $J = 1$ zerfällt in Pionen über das gesamte $m_{\pi\pi}$ Intervall mit einem Maximum bei $m_{\pi\pi} \approx 0.77$ GeV; die f_2 -Resonanz mit $J = 2$ dagegen

zerfällt nur für Werte $m_{\pi\pi} \approx 1.1$ GeV mit einem Maximum bei $m_{\pi\pi} \approx 1.27$ GeV; nicht-resonante $\pi^+\pi^-$ Produktion mit $J = 0$ zeigt ein Maximum bei niedrigen $m_{\pi\pi}$ Werten. Die signifikanten Werte von $\langle P_1 \rangle$ bei niedrigen $m_{\pi\pi}$ -Werten deuten auf eine Interferenz zwischen dem unteren Ausläufer des ρ -Mesons mit der nicht-resonanten $\pi^+\pi^-$ Produktion. Im Dominanzbereich des ρ -Mesons ($m_{\pi\pi} \approx 0.77$ GeV) zeigt der Absolutwert von $\langle P_1 \rangle$ ein Minimum. Bei hohen Werten $m_{\pi\pi}$ im Bereich der f_2 -Resonanz, deuten die Daten auf einen Vorzeichenwechsel von $\langle P_1 \rangle$ aufgrund der Interferenz des oberen Ausläufers der ρ -Resonanz mit der f_2 -Resonanz hin. Die dargestellten Kurven zeigen Berechnungen von $\langle P_1 \rangle$ in einem GPD-Modell, welches Beiträge des Quark- und des 2-Gluonaustausches berücksichtigt, die den qualitativen Verlauf der Daten gut beschreiben.

Tiefvirtuelle Compton-Streuung an Wasserstoff und Deuterium

Der Prozess der Tiefvirtuellen Compton-Streuung (DVCS) bietet die Möglichkeit, sowohl die Amplitude als auch die Phase der Streuamplitude zu messen, da ein Prozess mit gleichem Endzustand existiert, mit dem die exklusive Reaktion interferiert. Dieser Prozess ist als Bremsstrahlung bekannt und wird im Wesentlichen durch die Abbremsung der Elektronen im elektromagnetischen Feld der Atomkerne erzeugt (Bethe-Heitler Prozess). Der Interferenzterm zwischen beiden Prozessen erlaubt einen direkten Zugang zu beiden Teilen der DVCS Streuamplitude, dem Imaginär- und dem Realteil.

Der Imaginärteil ist zugänglich durch die Messung der Asymmetrie bezüglich des Winkels ϕ zwischen Leptonstreuungsebene und Photonproduktionsebene, die ihr Vorzeichen wechselt, wenn die longitudinale Strahlpolarisation P das Vorzeichen wechselt. Die Asymmetrie A_{LU} wird dann aus den Raten \vec{N} und \overleftarrow{N} für Ereignisse mit positiver bzw. negativer Strahlhelizität (L) berechnet, wobei das Targetgas unpolarisiert (U) ist:

$$A_{LU}(\phi) = \frac{1}{\langle P \rangle} \frac{\vec{N}(\phi) - \overleftarrow{N}(\phi)}{\vec{N}(\phi) + \overleftarrow{N}(\phi)}$$

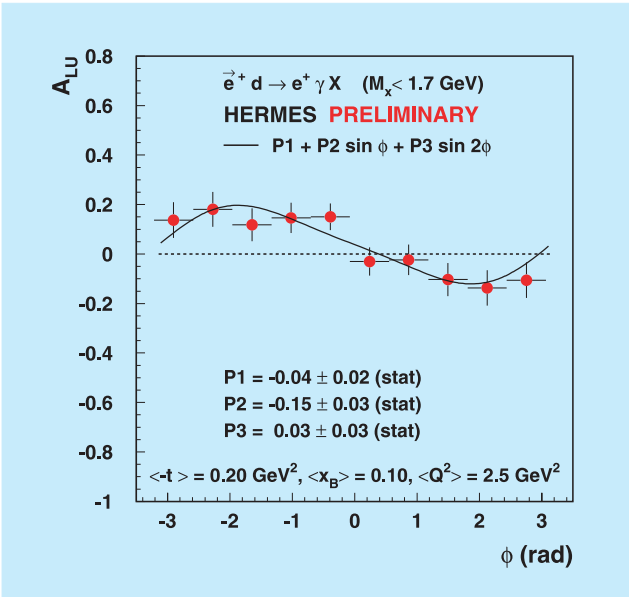


Abbildung 39: Vorläufige HERMES-Ergebnisse der Leptonen-Spin-Asymmetrie für unpolarisiertes Deuterium als Funktion von ϕ .

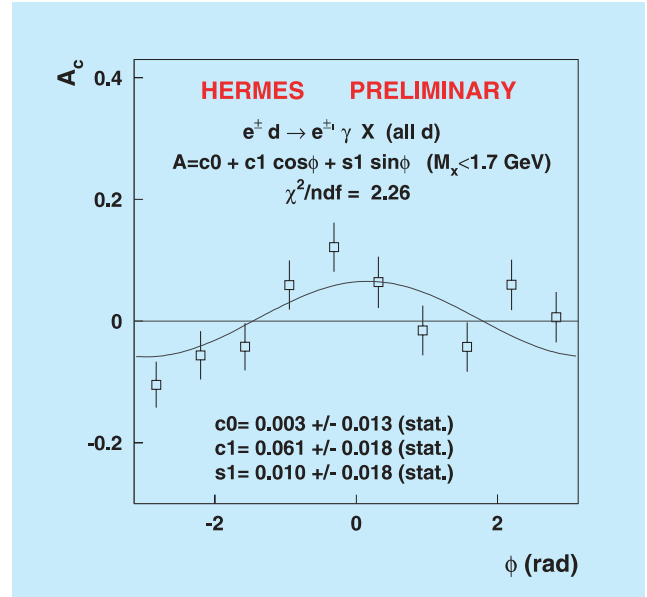


Abbildung 40: Vorläufige HERMES-Ergebnisse der Leptonen-Ladungs-Asymmetrie für unpolarisiertes Deuterium als Funktion von ϕ .

Der Realteil ist durch eine ähnliche Asymmetrie extrahierbar, doch statt der Strahlpolarisation wird in diesem Fall die unterschiedliche Ladung N^+ und N^- des Leptonenstrahls (Elektronen und Positronen) genutzt:

$$A_C(\phi) = \frac{N^+(\phi) - N^-(\phi)}{N^+(\phi) + N^-(\phi)}$$

Die Leptonen-Spin- und Leptonen-Ladungs-Asymmetrie sind für ein unpolarisiertes Deuterium-Target in den Abbildungen 39 und 40 gegen den Winkel ϕ aufgetragen.

In führender Ordnung wird für die Leptonen-Spin-Asymmetrie ein Sinus-Verhalten und für die Leptonen-Ladungs-Asymmetrie ein Cosinus-Verhalten vorhergesagt, was experimentell gut bestätigt werden konnte.

Um Schlussfolgerungen über die Dynamik der einzelnen Teile des Nukleons zu bekommen, ist es nötig, das Verhalten der Asymmetrien in Abhängigkeit vom Energie-Impuls Übertrag t auf das Nukleon zu studieren.

Abbildung 41 zeigt die $\cos \phi$ Amplitude von Wasserstoff und Deuterium als Funktion von t . Ebenfalls

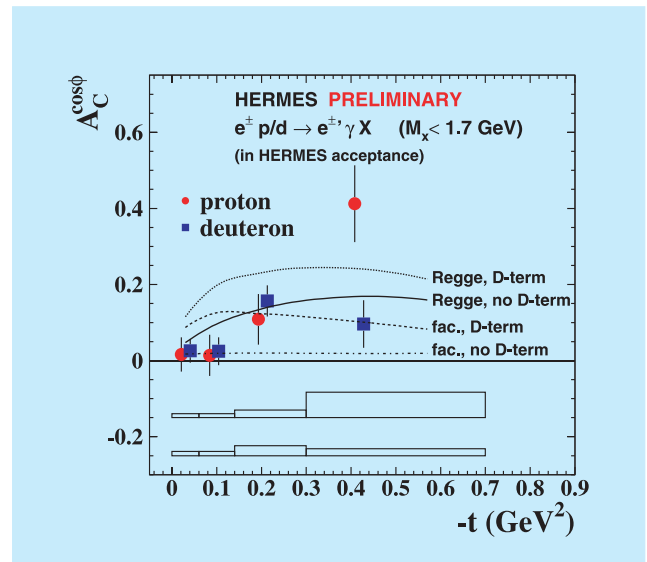


Abbildung 41: Vorläufige HERMES-Ergebnisse für die $\cos \phi$ Amplitude der Ladungs-Asymmetrie für Wasserstoff und Deuterium als Funktion von t . Die GPD Modell Berechnungen benutzen eine Faktorisierung oder eine Art Regge t -Abhängigkeit mit oder ohne D-Term.

sind verschiedene theoretische Berechnungen abgebildet, die auf unterschiedlichen GPD Modellen beruhen. Obwohl nur eine kleine Datenmenge analysiert wurde, ist es offensichtlich, dass die Messung der Leptonen-Ladungs-Asymmetrie sehr geeignet ist, um zwischen verschiedenen GPD Modellen zu unterscheiden.

Um die t -Abhängigkeit der beiden oben genannten Asymmetrien genauer zu untersuchen, wird im Spätsommer 2005 der Rückstoßdetektor installiert. Dieser Detektor ermöglicht den direkten Nachweis langsamer Rückstoßprotonen, die bisher nur durch indirekte Methoden bestimmt werden konnten.

Der HERMES Rückstoßdetektor

Zur Messung exklusiver Reaktionen plant die HERMES Kollaboration den Einbau eines neuen Detektors. Dieser umgibt das Target und soll Reaktionsprodukte moderaten Impulses unter großen Winkeln messen. Diese Reaktionsprodukte liegen außerhalb des Nachweisbereichs des existierenden HERMES Spektrometers; ihr Nachweis ist allerdings für die Identifikation mit geringem Untergrund dieser Klasse von Reaktionen unabdingbar. Der Rückstoßdetektor besteht

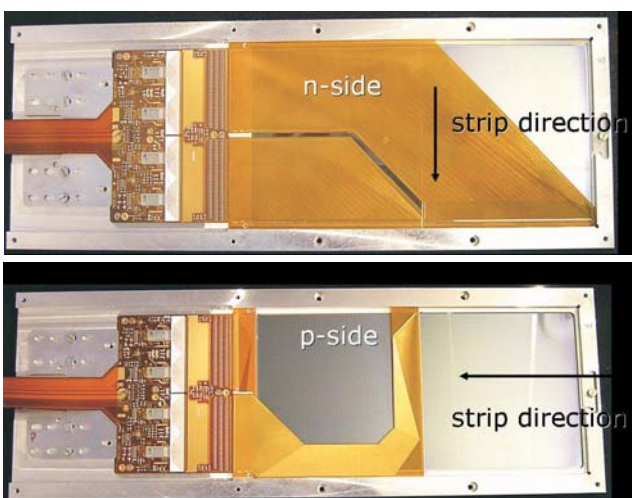


Abbildung 42: Bilder von der Vorder- und Rückseite eines Siliziummoduls des HERMES Rückstoßdetektors.



Abbildung 43: Bild vom fertiggestellten Detektor aus szintillierenden Fasern des HERMES Rückstoßdetektors.

aus einem supraleitenden Magneten, einem Wolfram-Szintillator Kalorimeter, einem Detektor aus szintillierenden Fasern und einem doppelseitigem Silizium-Streifendetektor.

Das Jahr 2004 war dem Bau und der ersten Vermessung dieser Einzelkomponenten gewidmet. Abbildung 42 zeigt Bilder von der Vorder- und Rückseite des Siliziummoduls und Abbildung 43 den fertiggestellten Detektor aus szintillierenden Fasern. Als Beispiel aus den verschiedenen durchgeführten Studien werden die Ergebnisse der Teststrahlstudien des Siliziumdetektors zusammengefasst.

Die Siliziummodule für den Rückstoßdetektor wurden im T22 Teststrahl bei DESY mit 3 GeV Elektronen getestet. Mit diesem Teststrahl sollten Informationen über das Verhalten der Sensoren auf minimal ionisierende Teilchen überprüft werden. Weitere Informationen bezüglich der Auflösung und der Effizienz konnten aus diesen Daten gewonnen werden.

Der Siliziumdetektor des Rückstoßdetektors ist darauf ausgelegt, auch große Signale zu messen, die durch langsame Protonen erzeugt werden. Dementsprechend ist das Signal eines minimal ionisierenden Teilchens

an der unteren Grenze des sensitiven Bereichs und eine besondere Herausforderung an die Analysetechnik.

In Abbildung 44 ist die Pulshöhenverteilung (in ADC Kanälen) für einen Beispielstreifen aufgetragen. Die Spitze in der linken Bildhälfte stellt das Pedestal mit Rauschen (den Nullwert) dar, während die Pulshöhenverteilung oberhalb von 25 ADC Kanälen der theoretisch erwarteten Verteilung für minimal ionisierende Teilchen gut folgt. Eine Extrahierung der Signale von Teilchen wurde erreicht indem die Pedestalverteilung mit der Gaußverteilung gefittet und anschließend von der gesamten Verteilung subtrahiert wurde. Dies ist möglich weil die Signalverteilung gut von der Untergrundverteilung getrennt ist.

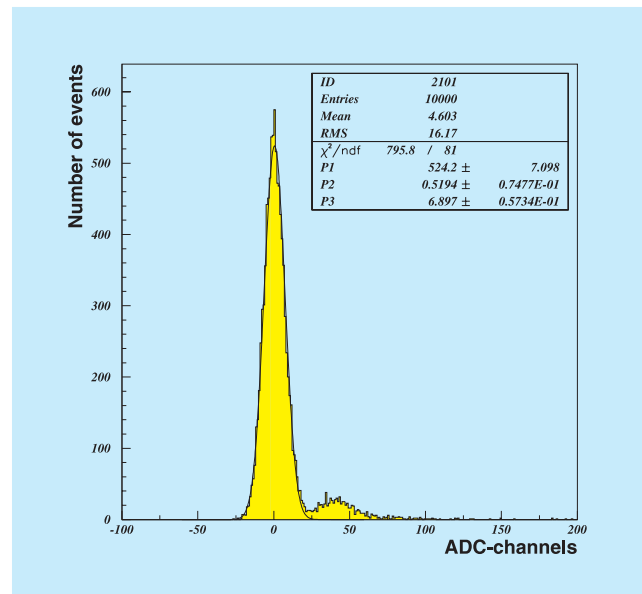


Abbildung 44: Die Pulshöhenverteilung (in ADC Kanälen) für einen Beispielstreifen des Siliziumdetektors des HERMES Rückstoßdetektors.

HERA-B Experiment

Beteiligte Institute: NIKHEF Amsterdam, Univ. Texas Austin, Univ. Barcelona, IHEP Beijing, Tsinghua Univ. Beijing, 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, UC Los Angeles, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

Sprecher: M. Medinnis, DESY

Mit dem HERA-B-Experiment soll insbesondere die Produktion schwerer Quarks in hochenergetischen Wechselwirkungen von Protonen mit Kernen untersucht werden. Das Experiment benutzt den HERA-Protonenstrahl, dessen Halo an den Atomkernen verschiedener dünner Drahttargets gestreut wird. Mit einer großen Akzeptanz, vorzüglicher Teilchenidentifikation und einem hochauflösenden Vertexdetektor bietet das HERA-B-Spektrometer die besten Voraussetzungen für detaillierte Studien komplexer Vielteilchen-Endzustände. Der Zwei-Lepton-Trigger von HERA-B kann mit einer ausgeklügelten, schnellen Elektronik Ereignisse, welche zwei Leptonen enthalten, aus einem hohen Untergrund selektieren. Zum Beispiel werden die Zerfälle von J/ψ -Mesonen in Leptonpaare unter einer milliardenfach höheren Zahl von anderen Ereignissen herausgefiltert. Durch die Benutzung von Targetdrähten aus verschiedenen Materialien (Kohlenstoff, Titan, Wolfram) kann mit HERA-B die Abhängigkeit der Teilchenproduktion von der Kernladungszahl untersucht werden.

Im letzten Jahr hat die Kollaboration an der Analyse der in der Datennahmeperiode 2002/03 von HERA-B genommenen Daten gearbeitet. Diese Daten enthalten etwa 150 Millionen Ereignisse, die mit dem Zwei-Lepton-Trigger aufgenommen wurden und von denen etwa 300 000 Ereignisse ein J/ψ -Meson im Endzustand enthalten. Zusätzlich wurden etwa 200 Millionen Ereignisse mit einem sogenannten „Minimum Bias Trig-

ger“ aufgenommen, die allgemeine Studien inelastischer Proton-Kern-Reaktionen erlauben.

Auf der Basis dieser Daten bereitet die HERA-B-Kollaboration verschiedene Veröffentlichungen über die Produktion schwerer Quarks (Bottom-, Charm- und Strange-Quarks) vor. Im Berichtsjahr sind zwei Analysen veröffentlicht worden: Grenzen auf flavour-ändernde neutrale Ströme im Zerfall neutraler D-Mesonen und Grenzen für die Produktion von Pentaquarkzuständen mit Strangeness. Beide Veröffentlichungen sind mit großem Interesse aufgenommen worden, was bei der Pentaquark-Analyse auch durch die Veröffentlichung in Physics Review Letters unterstrichen wird. Im Folgenden wird auf die im Berichtsjahr am weitesten fortgeschrittenen Analysen eingegangen.

Suche nach Pentaquarkzuständen

Der „Minimum Bias“ Datensatz wurde nach einer Signatur für die Produktion der exotischen Baryonen θ^+ (1530) und Ξ^- (1860) durchsucht. Diese neuen Baryonen wurden kürzlich in anderen Experimenten beobachtet und vorläufig als Bindungszustände von fünf Quarks, „Pentaquarks“, identifiziert, wie sie unter anderem von dem „Chiral Soliton Model“ vorhergesagt wurden. In HERA-B wurden diese Zustände nicht beobachtet. Die daraus abgeleiteten oberen Grenzen für deren Produktion sind äußerst einschränkend für theo-

retische Modelle, die Voraussagen für die Produktion solcher Zustände gemacht haben.

Der erste Hinweis auf die Existenz des $\theta^+(1530)$ -Baryons kam 2003 von dem LEPS-Experiment in der japanischen Forschungseinrichtung Spring-8. Mehrere Experimente, so auch ZEUS und HERMES an HERA, haben danach die Produktion dieses Zustandes bestätigt. Der Zustand $\Xi^-(1860)$ wurde bisher nur in dem CERN-Experiment NA49 beobachtet, bislang ohne Bestätigung von anderen Experimenten. HERA-B berichtete als erstes Experiment über die Nicht-Beobachtung dieser Zustände. Im Laufe des Berichtsjahres schlossen sich dann mehrere Experimente dieser Aussage an. Obwohl die Nicht-Beobachtungen die positiven Evidenzen nicht direkt widerlegen können, weisen sie doch darauf hin, dass die Produktionsmechanismen ähnlich exotisch wie die Teilchen selbst sein müssen. Durch die Bestimmung der oberen Grenzen für die Produktionsraten und, vielleicht noch wichtiger, durch obere Grenzen auf die Verhältnisse zu den Produktionsraten von wohlbekannten Zuständen, trägt HERA-B wesentlich zum Verständnis der Produktionsmechanismen bei und vielleicht auch zum Verständnis der Natur dieser Zustände selbst – wenn sie denn existieren.

Der J/ψ -Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt für J/ψ -Produktion in proton-induzierten Reaktionen wurde über einen weiten Bereich von Schwerpunktsenergien durch verschiedene Gruppen am Fermilab, CERN und kürzlich auch am RHIC gemessen. Allerdings ist die Situation nicht wirklich zufriedenstellend, da Messungen bei gleichen oder ähnlichen Energien zum Teil bis zu einem Faktor 2 differieren, weit außerhalb der angegebenen Fehler. Für HERA-B stellt diese Unsicherheit ein großes Problem dar, weil der J/ψ -Wirkungsquerschnitt als Referenz zur Normierung der mit dem Zwei-Lepton-Trigger genommenen Daten dient. Deshalb bemüht sich die HERA-B-Kollaboration, den J/ψ -Wirkungsquerschnitt selbst zu bestimmen, und zwar mit Hilfe des „Minimum Bias“ Datensatzes.

Abbildung 45 zeigt das aus diesen Daten gewonnene, sehr saubere Signal, das allerdings viel weniger J/ψ -Mesonen enthält als der getriggerte Datensatz (etwa 150

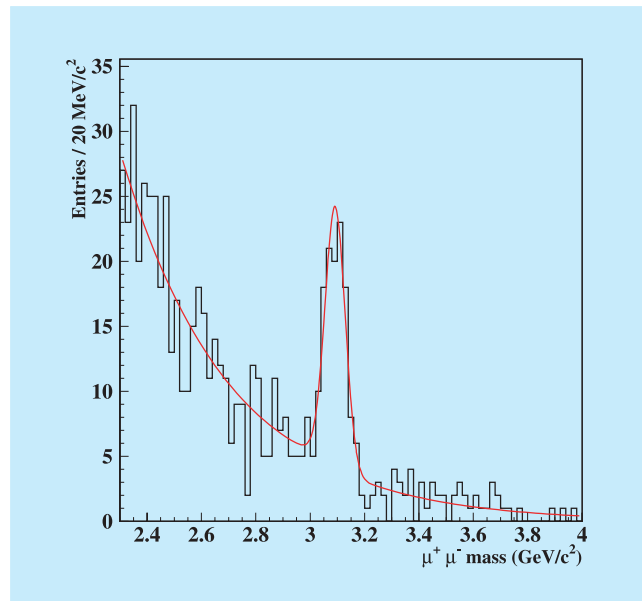


Abbildung 45: Das $\mu^+\mu^-$ -Massenspektrum im „Minimum Bias“ Datensatz. Die prominente Überhöhung bei etwa $3.1 \text{ GeV}/c^2$ stammt von Zerfällen des J/ψ .

im Vergleich zu den 300 000 J/ψ mit Trigger). Der Vorteil des „Minimum Bias“ Datensatzes besteht darin, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit weitaus einfacher und zuverlässiger bestimmt werden kann. Das vorläufige Ergebnis für den Wirkungsquerschnitt ist zusammen mit anderen Messungen in Abbildung 46 gezeigt. Die Proton-Kern Ergebnisse (pN) wurden auf die gleiche A-Abhängigkeit ($\alpha = 0.96$) umgerechnet. Die Analyse steht kurz vor dem Abschluss und soll in Kürze veröffentlicht werden. Diese neue Wirkungsquerschnittsmessung, kombiniert mit anderen Ergebnissen und theoretischen Annahmen für die Anpassung bei verschiedenen Energien, wird in Zukunft als Referenz für die Normierung anderer HERA-B-Messungen dienen: Ein Beispiel dafür ist die Bestimmung des Wirkungsquerschnittes der Beauty-Produktion, die im Folgenden beschrieben wird.

Die Erzeugung von Beauty-Quarks

Die Erzeugung von Bottom- und Antibottom-Quarks (b - und \bar{b} -Quarks mit der Quantenzahl Beauty) in

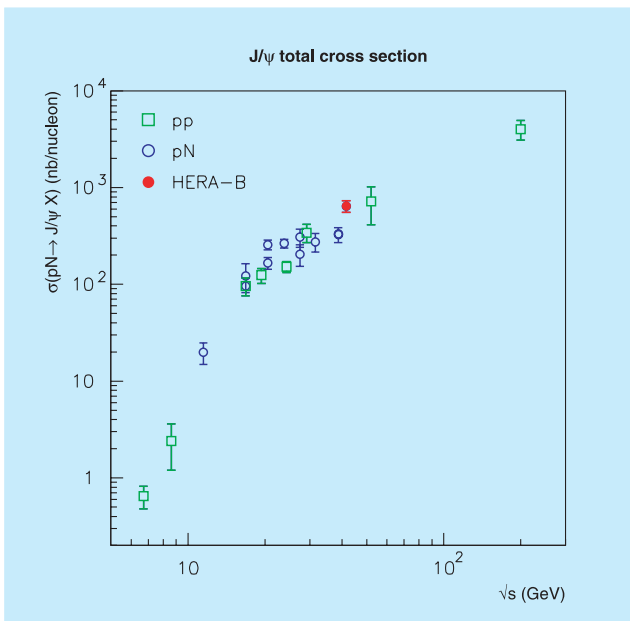


Abbildung 46: Zusammenstellung von Messungen des totalen Wirkungsquerschnitts für J/ψ -Produktion als Funktion der Schwerpunktsenergie.

proton-induzierten Reaktionen ist ebenfalls ein Gebiet, in dem die vorhandenen Messergebnisse widersprüchlich sind. In Reaktionen, die durch die starke Kernkraft vermittelt werden, wird immer ein Quark mit seinem Antiquark gemeinsam erzeugt. Nach der Erzeugung können sich sowohl das b - als auch \bar{b} -Quark mit leichteren Quarks und Antiquarks zu Bottom-Hadronen vereinen, die offen die Beauty-Quantenzahl des b - oder \bar{b} -Quarks tragen („open beauty“). Das Quark-Antiquark-Paar kann aber auch direkt einen Zustand der Υ -Familie bilden, wobei sich die Beauty-Quantenzahlen nach außen aufheben („hidden beauty“). Außer der HERA-B-Messung gibt es nur zwei weitere Messungen des „open beauty“ Wirkungsquerschnitts in dem gleichen Energiebereich, die aber nicht miteinander konsistent sind.

Um mit HERA-B den „open beauty“ Wirkungsquerschnitt zu messen, wird nach Zerfällen von Bottom-Hadronen in J/ψ gesucht. Die J/ψ -Zerfälle in Leptonen lassen sich sehr effizient mit dem Zwei-Lepton-Trigger selektieren. Die Abtrennung der J/ψ 's, die aus Zerfällen von Bottom-Hadronen stammen, von den weitaus überwiegenden direkt produzierten J/ψ 's gelingt durch Nut-

zung der endlichen Lebensdauer der Bottom-Hadronen: im HERA-B Detektor fliegt ein Bottom-Hadron typischerweise etwa 1 cm bevor es in andere Teilchen zerfällt. Dieser von dem Targetdraht separierte Zerfallsvertex kann mit dem Vertexdetektor sehr genau vermessen werden. Die Wirkungsquerschnittsmessung besteht nun darin, die Anzahl der „detached“ J/ψ 's mit der Anzahl der „direkten“ J/ψ 's zu vergleichen. Da aus anderen Experimenten bekannt ist, mit welcher Wahrscheinlichkeit Bottom-Hadronen in J/ψ 's zerfallen, lässt sich das Verhältnis des Bottom- zum J/ψ -Wirkungsquerschnitt bestimmen. Eine solche Relativmessung bietet den Vorteil, dass die Unsicherheiten in der Bestimmung der Effizienz des Zwei-Lepton-Triggers erheblich reduziert werden.

Entsprechend wurde der Υ -Wirkungsquerschnitt relativ zum J/ψ -Wirkungsquerschnitt bestimmt. Die Analyse beider relativen Wirkungsquerschnitte ist abgeschlossen. Die endgültigen Zahlen werden veröffentlicht, sobald der endgültige Wert des absoluten J/ψ -Wirkungsquerschnittes vorliegt.

A-Abhängigkeit der J/ψ -Produktion

Naiv würde man erwarten, dass der Wirkungsquerschnitt für selten erzeugte Teilchen, wie das J/ψ , einfach von der Anzahl der Nucleonen abhängt, die das einfallende Proton „sieht“, wenn es den Kern durchquert. Dann würde der Wirkungsquerschnitt linear von der Massenzahl des Targetkerns abhängen:

$$\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \cdot A.$$

Dabei ist σ_{pA} der Wirkungsquerschnitt für J/ψ -Produktion in einer Kollision eines Protons mit einem Kern der Massenzahl A und σ_{pN} ist der gleiche Wirkungsquerschnitt für die Kollision eines Protons mit einem einzelnen Nucleon (Proton oder Neutron). Experimentell ergibt sich allerdings, dass die obige Gleichung modifiziert werden muss, um die Beobachtungen zu beschreiben:

$$\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \cdot A^\alpha,$$

wobei der neu eingeführte Parameter α zu etwas weniger als 1 gemessen wird (im Mittel etwa 0.96) und vom

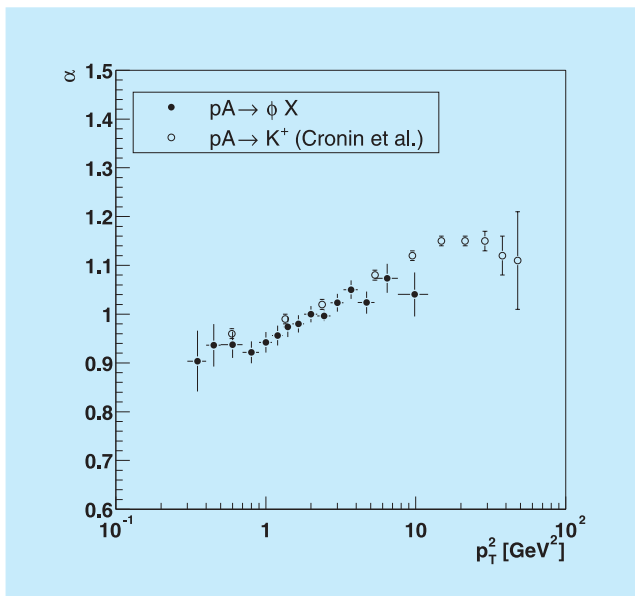


Abbildung 47: Die Abhängigkeit der „nuklearen Unterdrückung“ α (siehe Text) vom dem Impuls des J/ψ transversal zur Strahlrichtung.

Impuls des erzeugten J/ψ abhängt. Es gibt verschiedenen Spekulationen über den Grund für diese „ J/ψ -Unterdrückung“: mögliche Modifikationen der Partonimpulse der Nukleonen, wenn sie in einem Kern eingebettet sind, Modifikationen der Impulse der Partonen im Anfangszustand des Protons als Folge von Kollisionen in dem Kern vor der Erzeugung des J/ψ („re-scattering“), Aufbrechen des J/ψ in Kollisionen mit den anderen Nukleonen oder mit anderen in der Reaktion erzeugten Teilchen nach der J/ψ -Produktion und Quanteninterferenz-Effekte im Erzeugungsprozess. In Abbildung 47 ist ein vorläufiges Resultat von HERA-B für die Messung von α als Funktion des J/ψ -Impulses transversal zu der Strahlrichtung (p_T) im Vergleich zu einer Messung des Fermilab-Experimentes E866 gezeigt.

Die beiden Messungen stimmen gut überein. Die beobachtete Abhängigkeit vom Transversalimpuls lässt sich am ehesten mit dem oben erwähnten „re-scattering“-Mechanismus erklären. Wenn die Analysen abgeschlossen sind, wird HERA-B die Messungen von E866 in den theoretisch interessanten Bereich kleiner J/ψ -Longitudinalimpulse (parallel zur Strahlrichtung) erweitern.

Produktion von ψ' -Mesonen

Die theoretischen Modelle für die Produktion von Charmonium-Zuständen in hadronischen Reaktionen unterscheiden sich in den Vorhersagen der relativen Produktionsraten der verschiedenen Charmonium-Zustände wie η_c , J/ψ , ψ' , χ_c . Die Messung dieser verschiedenen Produktionsraten ist also wichtig, um die Modelle zu überprüfen und eventuell weiterzuentwickeln. Außerdem sind diese Messungen notwendig zum Verständnis der J/ψ -Raten, weil die beobachteten J/ψ 's zum Teil aus Zerfällen von anderen Charmonium-Zuständen stammen.

Nachdem HERA-B im letzten Jahresbericht bereits über die χ_c -Analyse berichtet hat, soll hier die Analyse der ψ' -Produktion dargestellt werden. Die ψ' -Produktion in proton-induzierten Reaktionen ist in einen weiten Energiebereich von Experimenten am Fermilab und CERN gemessen worden. Allerdings erlauben die experimentellen Daten auch in diesem Fall noch keine Beantwortung der angesprochenen Fragen. Gründe dafür sind geringe Statistik oder zu geringe Massenauflösung, um die Zustände trennen zu können. Das von HERA-B gemessene Massenspektrum von Myonpaaren in Abbildung 48 mit den prominenten Überhöhungen bei den J/ψ - und ψ' -Massen enthält etwa 150 000 J/ψ und 3000 ψ' . Daraus hat HERA-B das Produktionsverhältnis von ψ' zu J/ψ (jeweils für den Zerfall

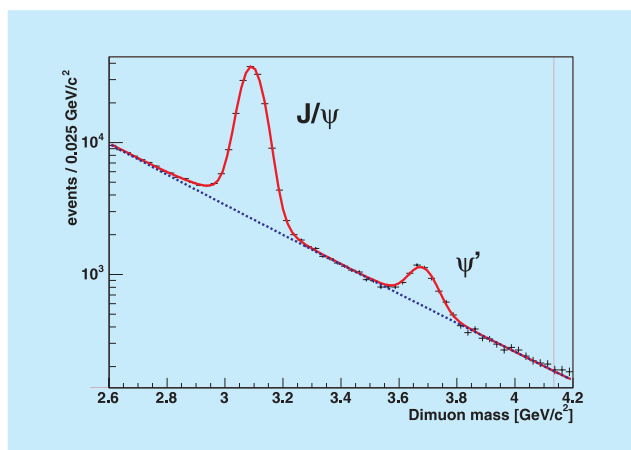


Abbildung 48: Massenspektrum von $\mu^+\mu^-$ -Paaren gemessen in Proton-Kern-Reaktionen mit den Signalen für J/ψ - und ψ' -Erzeugung.

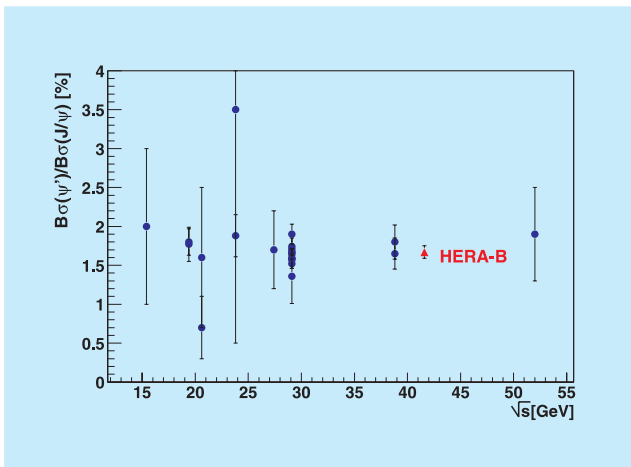


Abbildung 49: Messungen des Produktionsverhältnisses von ψ' zu J/ψ als Funktion der Energie. Die HERA-B-Messung hat den kleinsten statistischen Fehler. Die Messungen sind verträglich mit einer Energieunabhängigkeit.

in Myonpaare) bestimmt. In Abbildung 49 wird diese Messung mit denen anderer Experimente bei anderen Energien verglichen. Offensichtlich trägt HERA-B mit dem kleinen Fehler, der durch Hinzunahme des e^+e^- -Zerfallskanals noch verringert werden kann, wesentlich zur Verbesserung der experimentellen Situation bei.

A-Abhängigkeit der $\phi(1020)$ -Produktion

HERA-B hat erstmals die A-Abhängigkeit der $\phi(1020)$ -Produktion in Proton-Kern Reaktionen bestimmt. Wie das J/ψ ist das ϕ -Meson ein gebundener Zustand eines Quarks mit seinem eigenen Antiquark; in diesem Fall ist es ein Quark-Paar mit Strangeness und Anti-Strangeness. Auch hier wird die A-Abhängigkeit mit einem Potenzgesetz $\sim A^\alpha$ parametrisiert. Die Abhän-

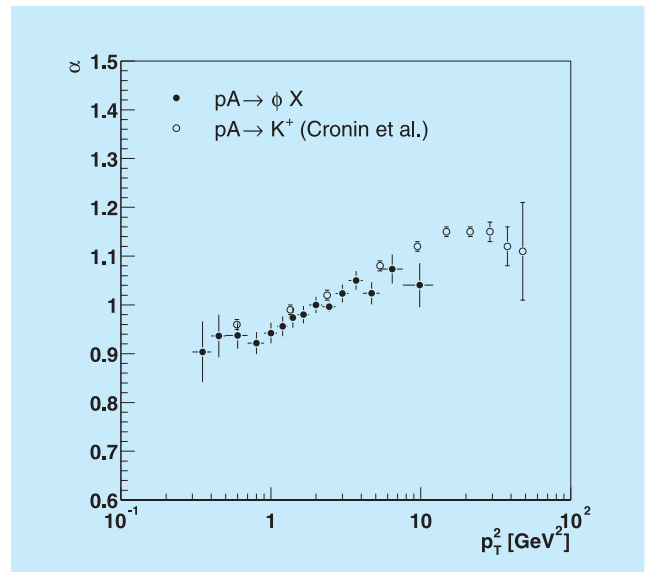


Abbildung 50: Die Abhängigkeit der „nuklearen Unterdrückung“ α (siehe Text) vom dem Impuls des $\phi(1020)$ transversal zur Strahlrichtung. Zum Vergleich wird eine Messung von α für die Produktion von K^+ -Mesonen gezeigt.

gigkeit des Exponenten α vom Transversalimpuls des ϕ -Mesons ist in Abbildung 50 gezeigt. Die Abbildung enthält auch einen Vergleich mit einer entsprechenden Fermilab-Messung für K^+ -Mesonen. Beide Messungen stimmen untereinander und auch mit den J/ψ -Daten überein, was dem „re-scattering“ Mechanismus, der im vorigen Abschnitt als primäre Erklärung für den Anstieg mit dem Transversalimpuls herangezogen wurde, zusätzliche Glaubwürdigkeit verleiht.

Die Veröffentlichung dieses Ergebnisses, zusammen mit der ebenfalls bestimmten A-Abhängigkeit des $K^*(892)$ -Zustandes und den differentiellen Wirkungsquerschnitten der Produktion der Vektormesonen $\phi(1020)$ und $K^*(892)$, ist in Vorbereitung.

Theoretische Physik

Sprecher: F. Schrempp

Das wissenschaftliche Programm der DESY-Theoriegruppe 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;
- Mathematische Physik.

HERA-Physik und QCD

Small-x Physik

Die Messungen der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung bei HERA haben intensive Untersuchungen der Physik kleiner Bjorken- x angeregt. Im letzten Jahr sind vor allem zwei Forschungsrichtungen verfolgt worden: ein genaueres Verständnis der BFKL-Dynamik sowie theoretische und numerische Untersuchungen von nichtlinearen Korrekturen zu den Evolutionsgleichungen der QCD (BFKL bzw. DGLAP).

Zum konsistenten Test der BFKL-Dynamik in der nächstführenden Ordnung (NLO) fehlen zur Zeit noch die NLO-Korrekturen zu den Impaktfaktoren, welche die Ankopplung der BFKL-Green-Funktion an äußere Teilchen beschreiben (die NLO-Korrekturen zur Green-Funktion sind seit einigen Jahren bekannt). Für den Photon-Impaktfaktor, der sowohl in der tiefinelastischen Streuung bei HERA als auch an einem e^+e^- -Linear Collider eine zentrale Rolle spielt, wurden die

analytischen Rechnungen soweit zu Ende geführt, dass nun numerische Rechnungen in Angriff genommen werden können. Erste numerische Resultate zu den reellen Korrekturen sind in [DESY 04-116] veröffentlicht. Für praktische Anwendungen ist die Entwicklung von effektiven numerischen Integrationsprogrammen von hoher Bedeutung. Erste Resultate mit einem solchen Computer-Algorithmus wurden in [hep-ph/0408008] vorgestellt. Zu den möglichen praktischen Anwendungen zählen auch Prozesse an Hadron Collidern, z. B. die W-Produktion [hep-ph/0409206, hep-ph/0409337]. Im Hinblick auf einen möglichen Zusammenhang der BFKL-Dynamik mit Stringtheorien ist die Erweiterung von der QCD auf supersymmetrische Eichtheorien von Interesse. In [DESY 04-085] wird die Erweiterung der BFKL-Green-Funktion auf $N = 4$ supersymmetrische Theorien beschrieben.

Die Balitsky-Kovchegov- (BK) Gleichung liefert einen attraktiven theoretischen Rahmen für die Untersuchung nichtlinearer Effekte bei hohen Gluondichten, die zum Phänomen der Saturation führen. Diese Gleichung wird vorwiegend im Farbdipol-Bild hergeleitet und diskutiert; der Vorteil dieser Beschreibungsweise liegt vor allem in seiner physikalischen Anschaulichkeit. Zum Verständnis physikalischer Endzustände und zur Berechnung von Wirkungsquerschnitten ist es notwendig, diese Gleichung auch im Impulsraum zu analysieren: in [DESY 04-067] wird eine Herleitung der Gleichung im Impulsraum beschrieben. Hierbei spielen die Symmetrieeigenschaften der BFKL-Näherung eine zentrale Rolle. Der Impulsraum-Zugang erlaubt es auch, Korrekturen zum Integralkern der BK-Gleichung zu berechnen. Von besonderem Interesse ist der Zusammenhang der BK-Gleichung mit diffraktiven Endzuständen. In [DESY 04-252] wurde gezeigt, dass die BK-Gleichung nur einen Teil des elastischen diffraktiven Endzustands enthält. Bisher stützen sich die Untersuchungen von Lösungen der nichtlinearen BK-Gleichung vor allem auf numerische Untersuchungen

gen; insbesondere wurde auf diese Weise die Existenz von Soliton-Lösungen gezeigt. Als erster Schritt auf dem Wege zu analytischen Lösungen wurde in [DESY 04-104] die BK-Gleichung in $2 + 1$ Dimensionen untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass die Gleichung zur Klasse der Painlevé-Gleichungen gehört. Eine numerische Abschätzung höherer Korrekturen zur BK-Gleichung wird in [DESY 04-153] durch die Einführung eines Rapidity-Vetos berechnet.

Die Beschreibung der HERA-Daten für Elektron-Proton-Streuung bei kleiner Photonvirtualität Q^2 führt im Standardformalismus der tiefinelastischen Streuung zu Problemen. Insbesondere liefern Fits an die Daten eine unphysikalische, negative Gluondichte bei kleinen Q^2 . Ausgehend von der Überlegung, dass Photonen mit kleinem Q^2 einzelne Partonen im Proton nicht auflösen können, wurde in [hep-ph/0402248] eine phänomenologische Beschreibung im Rahmen der verallgemeinerten Vektormeson-Dominanz vorgeschlagen. Mit nur wenigen Parametern wurde gute Übereinstimmung mit den gemessenen Strukturformfaktoren bei kleinem Q^2 erreicht. Eine Kombination dieses Zugangs mit dem Formalismus der Partondichten erlaubt eine gute Beschreibung der Daten im gesamten Bereich von Q^2 und Bjorken- x .

Instantonen und Saturation

Als klassische, nichtperturbative und explizit bekannte Fluktuationen des Gluon-Feldes $\propto 1/\sqrt{\alpha_s}$ stellen *Instantonen* einen interessanten alternativen Zugang zum Saturationphänomen dar. Im kinematischen Bereich der Saturation ist die mögliche Relevanz solcher nichtperturbativen Feldkonfigurationen der QCD wohl motiviert. Ihre Untersuchung wurde daher intensiv weiterverfolgt [hep-ph/0401137, DESY 04-124]. Wichtigstes Ergebnis dieses Zugangs ist, dass Instantonen als klassische Hintergrundfelder tatsächlich Anlass zur Gluonsaturation geben. Als charakteristische Saturationsskala ergibt sich die von Gittersimulationen bekannte mittlere Instantongröße $\langle \rho \rangle \approx 0.5$ fm. Besonders interessant erscheint schließlich die Identifikation des „Farbglas-Kondensats“ mit dem QCD-Sphaleron [DESY 04-124], einem wohlbekannten, kohärenten Multi-Gluon-Zustand auf dem Gipfel der Potentialbarriere, die im Instantonbild benachbarte, topologisch nicht äquivalente Vakua trennt.

Diffraktion

Ein neuer Zugang zur Dynamik der diffraktiven tiefinelastischen Streuung wurde in [hep-ph/0409119] vorgestellt. Die Vielfachstreuung des vom Photon ausgelösten Quarks im Proton wird im Grenzfall großer Q^2 durch Wilson-Linien beschrieben, welche in der feldtheoretischen Definition der Partondichten auftreten. Durch diese Vielfachstreuung wird eine effektive Neutralisation von Farbladungen ermöglicht, die ein (für diffraktive Prozesse charakteristisches) intaktes schnelles Proton im Endzustand erlaubt. Diese Überlegungen liefern eine theoretische Motivation für das phänomenologische Modell der „Soft Color Interactions“, welches auch eine Rekombination der Farbladungen sowohl diffraktive als auch nichtdiffraktive Endzustände gut beschreibt.

Für diffraktive Prozesse in der tiefinelastischen Streuung existieren Faktorisierungstheoreme, die deren Beschreibung mit Hilfe von „diffraktiven Partondichten“ erlauben. Die theoretische Analyse sagt eine Brechung dieser Faktorisierung in der Photoproduktion vorher. Die Stärke dieser Brechung ist auch mit Blick auf Anwendungen in Proton-Proton-Stößen am LHC von Bedeutung. In [DESY 04-011] wurde die diffraktive Photoproduktion von hadronischen Di-Jets zur nächstführenden Ordnung in α_s berechnet. Ein Vergleich mit vorläufigen Daten der H1-Kollaboration zeigt eine deutliche Brechung der Faktorisierung um etwa einen Faktor 3 im Wirkungsquerschnitt. In [hep-ph/0410105] wurde diese Analyse auf den Fall endlicher kleiner Q^2 ausgeweitet.

Verallgemeinerte Partondichten

Verallgemeinerte Partondichten beschreiben grundlegende Aspekte der Struktur des Protons auf der Ebene von Quarks und Gluonen. Die Messung dieser Größen in exklusiven Streuprozessen wird aktiv von den HERA-Experimenten verfolgt. Der Buchbeitrag [Burkert und Diehl, 2004] gibt eine Übersicht über die relevanten theoretischen und experimentellen Ergebnisse. Summenregeln verknüpfen verallgemeinerte Partondichten mit den elektromagnetischen Formfaktoren, die in elastischer Lepton-Nukleon-Streuung sehr gut gemessen sind. In [DESY 04-146] wurde eine Parametrisierung der verallgemeinerten Dichten entwickelt und

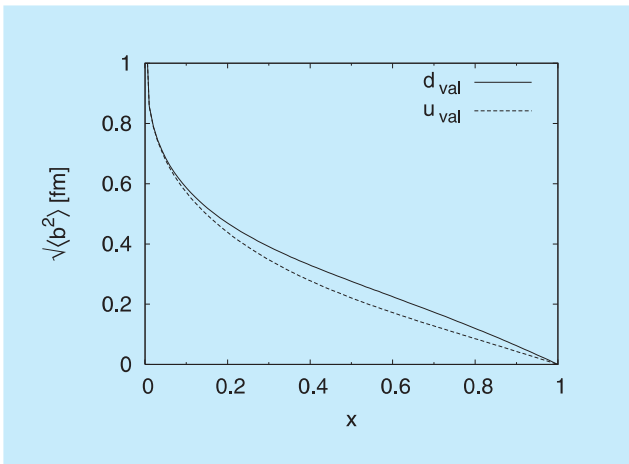


Abbildung 51: Mittlerer Radius $\sqrt{\langle b^2 \rangle}$ der transversalen räumlichen Verteilung eines Valenzquarks in Abhängigkeit vom Impulsbruchteil x des Quarks im schnell bewegten Proton.

an die experimentell gemessenen Formfaktoren angepasst. Ergebnisse dieser Studie stimmen qualitativ mit ersten Berechnungen in der Gittereichtheorie überein. Insbesondere wird die räumliche Verteilung von Valenzquarks in der Ebene senkrecht zum Impuls eines schnell bewegten Protons mit zunehmendem Impuls des Quarks (Abb. 51) deutlich kompakter. Weiterhin wurde der Beitrag des Bahndrehimpulses von Valenzquarks zum Gesamtspin des Protons abgeschätzt: die Beiträge von u - und d -Quarks sind für sich genommen groß, kompensieren sich jedoch weitgehend in ihrer Summe.

Fragmentation

In der QCD wird die inklusive Erzeugung von Hadronen mit Hilfe von Fragmentierungsfunktionen beschrieben. Das Faktorisierungstheorem der QCD sagt für diese Objekte zwei wichtige Eigenschaften vorher, die experimentell überprüft werden können, nämlich Universalität und wohldefiniertes Skalenverhalten. Im Bereich kleiner Impulsüberträge z vom Mutterparton an das Hadron überwiegt die Fragmentierung des Gluons, und die Skalenabhängigkeit weicht in charakteristischer Weise von der wohlbekannten DGLAP-Evolution ab. Dort findet die modifizierte Näherung durch führende Logarith-

men (MLLA) Anwendung. Im Rahmen dieses Formalismus wurden die Gluon-Fragmentierungsfunktion für leichte Hadronen (π^\pm , K^\pm und p/\bar{p}) und der asymptotische Skalenparameter Λ_{QCD} durch einen globalen Fit an Daten der e^+e^- -Annihilation bei kleinen z -Werten und verschiedenen Energien bestimmt. Hierbei wurde eine vorzügliche Beschreibung der Daten über den wohlbekannten Gaußschen Höcker (*hump-backed plateau*) hinweg erzielt [DESY 04-039]. Ferner wurde gezeigt, dass die höheren Momente der MLLA-Evolution als unvollständige Terme höherer Ordnung betrachtet werden müssen, und dass die Beschreibung der Daten verbessert wird, wenn diese Terme weggelassen werden [DESY 04-142].

Die inklusive Produktion leichter Hadronen in der tiefinelastischen Lepton-Nukleon-Streuung wurde zur nächstführenden Ordnung (NLO) in der starken Kopplungskonstanten α_s unter Verwendung der Fragmentierungsfunktionen aus [DESY 00-086] behandelt [DESY 04-224]. Die gefundenen NLO-Korrekturen sind in gewissen Phasenraumbereichen, insbesondere bei kleinen Werten von Bjorken- x , von beträchtlicher Größe und führen zu einer guten Übereinstimmung mit den von der H1- bzw. ZEUS-Kollaboration bei HERA gemessenen Verteilungen der Wirkungsquerschnitte für neutrale Pionen und geladene Hadronen.

Die inklusive Photoproduktion von D^* -Mesonen zusammen mit hadronischen Jets wurde in der Näherung masseloser Quarks unter Verwendung der Fragmentierungsfunktionen aus [DESY 97-241] zu NLO berechnet [DESY 04-181]. Die gute Übereinstimmung mit jüngsten ZEUS-Daten stellt einen wertvollen Test für die Universalität der Fragmentierungsfunktionen dar. Weiterhin konnte die Gegenwart sogenannter intrinsischer Charm-Quarks im aufgelösten Photon nachgewiesen werden.

Die inklusive Hadroproduktion schwerer Hadronen (D , B) im Übergangsbereich zwischen kleinen ($p_T \lesssim m_h$) und großen ($p_T \gg m_h$) Transversalimpulsen wurde in NLO im Rahmen eines theoretischen Formalismus behandelt, der einerseits Massenkorrekturen vollständig berücksichtigt und andererseits die Universalität und Skalenverletzung der Fragmentierungsfunktionen gewährleistet. Theoretische Vorhersagen für die inklusive D^* -Erzeugung in Proton-Antiproton-Stößen am Tevatron stimmen innerhalb der Fehler mit Daten der CDF-Kollaboration überein [DESY 04-172]. Vor-

läufige Daten zur inklusiven D^* -Photoproduktion bei ZEUS werden ebenfalls in diesem Formalismus relativ gut beschrieben [DESY 04-196].

Nichtrelativistische QCD

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz sogenannter Farboktettprozesse vorher, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Da die Überprüfung dieser Theorie in niederster Ordnung durch beträchtliche Skalenunsicherheiten erschwert wird, ist ihre Behandlung in nächstführender Ordnung in α_s bzw. der Relativgeschwindigkeit v der gebundenen Quarks nötig. Als ein erster Schritt in diese Richtung wurde die Erzeugung von prompten J/ψ -Mesonen zusammen mit hadronischen Jets [DESY 04-080] bzw. prompten Photonen [DESY 04-149] durch direkte Photoproduktion in Zwei-Photon-Stößen an einem e^+e^- -Collider betrachtet. Dabei wurden signifikante NLO-Korrekturfaktoren gefunden. Diese Untersuchungen sind auch in konzeptioneller Hinsicht lehrreich, da verschiedene Typen von Singularitäten zusammenwirken und die Mischung der beitragenden NRQCD-Operatoren unter Renormierung berücksichtigt werden muss.

Das Potential zwischen einem statischen Quark und seinem Antiquark wurde in der Zweischleifenordnung für den Fall berechnet, dass sich das gebundene System im Farboktettzustand befindet. Während das Ergebnis zu einer Schleife mit demjenigen für den Farbsingulettzustand übereinstimmt, tritt in der Zweischleifenordnung erstmals eine Abweichung auf. Dieses Ergebnis wird in der NRQCD zur Behandlung ultraweicher Gluonen in höheren Ordnungen der Störungstheorie benötigt. Ferner wird es für die Untersuchung der Gluino-Antigluino-Paarerzeugung in der Schwellenregion gebraucht und bestimmt die Eigenschaften von „Glueballinos“, den supersymmetrischen Partnern der Gluebälle [DESY 04-232].

QCD und elektroschwache Physik

Theorien zur Vereinheitlichung der fundamentalen Wechselwirkungen (GUT) sagen vorher, dass gewisse

Klassen laufender Kopplungen sich an der GUT-Energieskala treffen. Um diese laufenden Kopplungen an der elektroschwachen Energieskala durch die experimentell ermittelten Werte der Kopplungen und Massen auszudrücken, werden sogenannte Schwellenrelationen benötigt. Für die laufenden Yukawakopplungen der ersten fünf Quark-Flavors wurden diese Schwellenrelationen in der dominanten Zweischleifenordnung $\mathcal{O}(\alpha_{em}\alpha_s)$ berechnet [DESY 04-108].

Die NuTeV-Kollaboration hat den elektroschwachen Mischungsparameter $\sin^2 \theta_W$ in der Streuung von Neutrinos oder Antineutrinos am Nukleon bestimmt. Das Ergebnis ist als Hinweis auf neue Physik jenseits des Standardmodells interpretiert worden. Die Extraktion von $\sin^2 \theta_W$ hängt jedoch von einer möglichen Asymmetrie in der Verteilung von s -Quarks und Antiquarks im Nukleon ab, welche in einem phänomenologisch erfolgreichen Modell für Partonverteilungen abgeschätzt wurde. Das Ergebnis dieser Abschätzung reduziert die Abweichung des NuTeV-Resultats vom Standardmodell auf etwa zwei Standardabweichungen, so dass die Messung keinen signifikanten Nachweis für neue Physik liefert [hep-ph/0407364].

Gittereichtheorie

Die Aktivitäten im Bereich Gittereichtheorie konzentrierten sich einerseits auf Simulationen der QCD mit dynamischen Quarks, andererseits auf Rechnungen mit exakter chiraler Symmetrie, die wegen des hohen numerischen Aufwands bislang noch in der *quenched* Approximation durchgeführt werden müssen.

Ziel dieser Rechnungen ist 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.

Gitter-QCD mit leichten Quarks

Die $qq + q$ -Kollaboration hat die numerischen Simulationen der QCD mit zwei leichten, dynamischen Quarks

fortgesetzt. Mit Hilfe der Untersuchung der Quarkmassenabhängigkeit der Pion-Masse und der Pion-Zerfallskonstanten wurden die ersten Abschätzungen bestimmter Kombinationen von Gasser-Leutwyler-Koeffizienten veröffentlicht [DESY 04-046, 04-158].

Um die Extrapolation zum Kontinuumslimit zu erleichtern, wurden die numerischen Simulationen mit leichten Quarks – in einer erweiterten Kollaboration mit der NIC-Forschungsgruppe am DESY in Zeuthen – in der sogenannten „Twisted-Mass-Formulierung“ der QCD fortgesetzt [DESY 04-098, DESY 04-162, DESY 04-188]. Dabei wurde in erster Linie die Phasenstruktur um die Singularität bei verschwindender Quarkmasse untersucht. Es wurde gezeigt, dass bei verschwindender Quarkmasse ein Phasenübergang erster Ordnung existiert, dessen Stärke von der Wahl der Eichwirkung abhängt.

QCD im ϵ -Regime

Als ϵ -Regime der QCD bezeichnet man den kinematischen Bereich, der durch ein endliches Volumen bei beliebig kleinen Quarkmassen definiert ist. Die chirale Störungstheorie lässt sich auch auf diese Situation

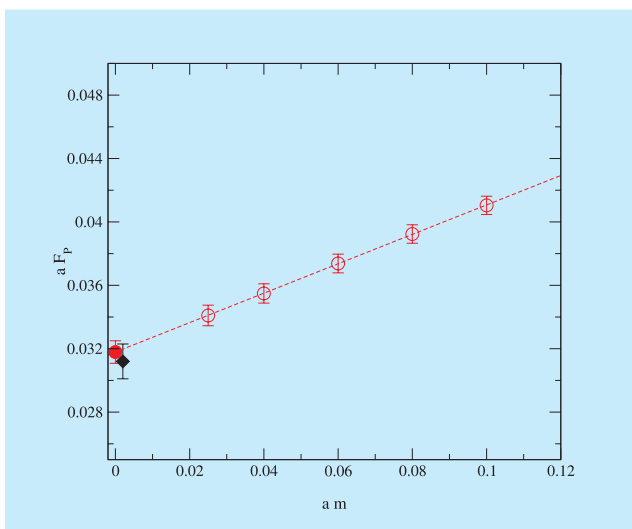


Abbildung 52: Berechnung der Pion-Zerfallskonstanten im ϵ -Regime (schwarze Raute), sowie durch chirale Extrapolation der Daten im p -Regime (rote Punkte und Linie).

anwenden, wobei die chirale Entwicklung durch dieselben Gasser-Leutwyler-Koeffizienten parametrisiert wird wie die Theorie im physikalisch großen Volumen (p -Regime). Durch Vergleich mit Gitterdaten der QCD im ϵ -Regime können diese Koeffizienten mit *finite-size scaling* Verfahren bestimmt werden.

In einer ersten Rechnung [DESY 04-009] konnte die Parametrisierung beider kinematischer Bereiche durch einen konsistenten Satz von effektiven Kopplungskonstanten explizit verifiziert werden. Hierzu wurde die Pion-Zerfallskonstante in zwei voneinander unabhängigen Simulationen im ϵ - und p -Regime bestimmt (Abb. 52). Eine technische Schwierigkeit der Simulation im ϵ -Regime bestand in der extremen statistischen Fluktuation der relevanten Korrelationsfunktionen. Unsere Gruppe hat eine Methode entwickelt, die die Beiträge der niedrigen Eigenmoden des Gitter-Dirac-Operators zu Korrelationsfunktionen exakt berücksichtigt. Durch dieses sogenannte *low-mode averaging* konnte das statistische Signal entscheidend verbessert werden.

$K \rightarrow \pi\pi$ und die $\Delta I = 1/2$ Regel

In einer weiteren Publikation [DESY 04-081] wurde eine Strategie vorgestellt, die es ermöglichen soll, die Ursachen der bekannten $\Delta I = 1/2$ -Regel im Zerfall $K \rightarrow \pi\pi$ zu untersuchen. Im Zentrum des Interesses steht die Frage nach der Rolle des Charm-Quarks, und ob seine relativ große Masse den Zerfall in den $\pi\pi$ -Endzustand mit Isospin 0 begünstigt. Insbesondere versucht man die Effekte des Charm-Quarks von den übrigen QCD-Effekten zu isolieren. Dies soll durch den Vergleich der Resultate für den Fall eines unphysikalisch leichten Charm-Quarks ($m_c = m_u$) mit der physikalischen Situation erreicht werden. Die Zerfallsamplituden für $K \rightarrow \pi\pi$ lassen sich durch effektive Kopplungskonstanten der chiralen Störungstheorie ausdrücken, und das Ziel der Gitterrechnung ist die Bestimmung dieser Kopplungsparameter, analog zum Fall der Pion-Zerfallskonstante. Ein zentraler Bestandteil unserer Strategie ist die Verwendung des ϵ -Regimes: durch das veränderte chirale Zählschema wird ein Vergleich von Gitterdaten mit den Ausdrücken der chiralen Störungstheorie zur nächstführenden Ordnung ermöglicht. Im p -Regime ist das entsprechende *matching* zu dieser Ordnung i. a. nicht durchführbar. Die Verwendung

von Gitter-Fermionen mit exakter Symmetrie ist ein weiterer großer Vorteil bei der Berechnung der nötigen Operatormatrixelemente, da keine Mischung mit Operatoren verschiedener Chiralität auftritt, und die schwierige nichtperturbative Subtraktion von Operatoren niedriger Dimensionen völlig vermieden werden kann.

Die Simulationen im ϵ -Regime sind allerdings technisch sehr aufwendig und kostspielig. Insbesondere sind die statistischen Fluktuationen in den betrachteten 3-Punkt-Korrelationsfunktionen so groß, dass *low-mode averaging* nur mit einer hohen Zahl berechneter Eigenmoden eine befriedigende Wirkung zeigt [DESY 04-171]. Konkrete Resultate werden in nächster Zeit erwartet.

B-Physik

Theoretische Untersuchungen der Physik schwerer Quarks sind ein wesentlicher Bestandteil der seit einigen Jahren in der DESY-Theoriegruppe und am II. Institut für Theoretische Physik durchgeführten Arbeiten. Die B-Fabriken am KEK (Japan) und PEP (USA) sowie die Experimente CDF und D0 am Fermilab (USA) liefern die wichtigsten experimentellen Ergebnisse, die für die Präzisionsphysik der B-Mesonen von zentraler Bedeutung sind. Mit besonderer Aufmerksamkeit wurden die Daten für die seltenen B-Zerfälle und die CP-Asymmetrie in B-Meson-Übergängen verfolgt.

Der Zerfall $B \rightarrow X_s \gamma$ spielt als Präzisionstest der Flavorübergänge im Standardmodell und in supersymmetrischen Theorien eine wichtige Rolle. Um die Abschätzungen im Standardmodell zu untermauern, ist die Next-to-next-to-leading-Ordnung (NLL) der QCD-Strahlungskorrekturen für die Zerfallsrate $\Gamma(B \rightarrow X_s \gamma)$ erforderlich. Ein wesentlicher Teil dieser Strahlungskorrekturen (3-loop-Matching) wurde berechnet [DESY 04-001]. Der Zerfall $B \rightarrow X_d \gamma$ liefert wichtige Information über das Element V_{td} der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM). Der inklusive Zerfall ist aber bis jetzt wegen des Kontinuum-Hintergrunds experimentell nicht zugänglich. Die exklusiven Zerfälle $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$ stellen eine Alternative dar und sind in NL-Ordnung theoretisch berechnet worden [DESY 04-065]. Die Übergänge $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$

sind zwar noch nicht gemessen worden, aber die vorhandenen oberen Schranken sind für die CKM-Phänomenologie schon interessant und liefern komplementäre Information über das CKM-Unitaritätsdreieck.

Die Experimente BABAR und BELLE haben Messungen der zeitabhängigen CP-Asymmetrie in den Zerfällen $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ und $\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ sowie die erste statistisch signifikante Messung der sogenannten direkten CP-Verletzung in den Zerfällen $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ und $\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+$ veröffentlicht. Diese Messungen liefern wichtige Hinweise auf die Winkel des Unitaritätsdreiecks sowie auf mögliche Physik jenseits des Standardmodells und sind für die Entschlüsselung der Flavordynamik der B-Mesonen sehr hilfreich. Sie wurden, zusammen mit anderen Messungen der CP-Asymmetrien und der CKM-Matrix, phänomenologisch untersucht [DESY 04-036]. Die erlaubten Werte (berechnet mit 68% C.L.), $81^\circ \leq \alpha \leq 103^\circ$, $21.9^\circ \leq \beta \leq 25.5^\circ$ und $54^\circ \leq \gamma \leq 75^\circ$, sind mit deren indirekten Abschätzungen innerhalb des Standardmodells in sehr guter Übereinstimmung.

Weitherhin wurden die Eigenschaften des Systems schwerer Quarks $\bar{b}c$ theoretisch untersucht. Die Hyperfeinaufspaltung im System $\bar{b}c$ in der NL-Ordnung wurde mit Hilfe der nichtrelativistischen Renormierungsgruppe berechnet. Das Ergebnis $M(B_c^*) - M(B_c) = 65 \pm 24(\text{th})_{-16}^{+19}(\delta\alpha_s)$ MeV [DESY 04-042] ist experimentell noch nicht überprüft worden. Der Wirkungsquerschnitt $\sigma(p\bar{p} \rightarrow B_c^* X)$ wurde mit Hilfe der sogenannten k_\perp -Faktorisierungsmethode berechnet und ist in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Messungen am Tevatron [DESY 04-220]. Eine Zusammenfassung der theoretischen Aspekte der Physik schwerer Quarks in zahlreichen Zerfällen von B-Mesonen wurde zusammen mit den experimentellen Ergebnissen veröffentlicht und führt zum Schluss, dass das Standardmodell alle Flavorübergänge gut beschreibt [DESY 04-236].

Collider-Physik

Der Protonen Collider LHC und der e^+e^- -Linear Collider ILC sind die entscheidenden experimentellen Instrumente, um in naher Zukunft die grundlegenden Aspekte der Physik bei hohen Energien im TeV-Bereich

verstehen zu können. Sie werden es erlauben, ein klares Bild der Massenerzeugung im Higgs-Mechanismus des Standardmodells oder der in jüngster Zeit entwickelten Alternativen, wie etwa Little-Higgs-Modellen, zu entwerfen.

Von physikalisch großer Attraktivität ist die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells, die stabile Verbindungen bis zur Planck-Skala aufzubauen gestattet, wo die Teilchenphysik mit der Gravitation vereinheitlicht wird. Um in diesen Bereich vordringen zu können, müssen Extrapolationen ausgeführt werden, welche ein genaues physikalisches Bild an der elektroschwachen Skala erfordern. Auf diese Weise lassen sich die fundamentale supersymmetrische Theorie und ihr Brechungsmechanismus rekonstruieren. Supergravitationstheorien sind, neben anders gearteten, kosmologisch motivierten Alternativen, hervorragende Kandidaten, die zu einem vereinheitlichten Bild führen. Ihre Eigenschaften können in Experimenten an den zukünftigen TeV-Collidern eindeutig und präzise erfasst werden.

Higgs-Physik

Higgs-Physik am LHC und ILC

Die Suche nach dem Higgs-Boson H , dem fehlenden Glied im Standardmodell der Elementarteilchen, stützt sich am LHC im Massenbereich unterhalb von etwa 140 GeV vor allem auf das photonische Zerfallssignal, so dass eine möglichst genaue theoretische Vorhersage des entsprechenden Verzweigungsverhältnisses benötigt wird. Der Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$ vollzieht sich in niederster Ordnung der Störungsrechnung durch Feynman-Diagramme, in denen ein virtuelles W -Boson oder Top-Quark zirkuliert. Die führenden Korrekturen der starken Wechselwirkung (in $\mathcal{O}(\alpha_s)$) wurden vor mehr als einem Jahrzehnt von einer DESY-Gruppe berechnet. Kürzlich wurden die führenden elektroschwachen Korrekturen (in $\mathcal{O}(G_F m_t^2)$), die durch die große Top-Yukawakopplung hervorgerufen werden, mit Hilfe der Methode der asymptotischen Entwicklung ausgewertet. Kurioserweise stellt sich heraus, dass diese beiden Korrekturen sich näherungsweise gegenseitig aufheben [DESY 04-040].

Die Reaktion $pp \rightarrow t\bar{t} + \text{jet}$ am LHC ist ein wichtiger Untergrund für die Suche nach dem Higgs-Boson im

Massenbereich $m_H < 200$ GeV. Der wichtige Signalprozess ist hier die Vektorboson-Fusion mit anschließendem Zerfall $H \rightarrow WW$. Der Wirkungsquerschnitt für $t\bar{t} + \text{jet}$ -Produktion muss besser als auf 10% genau bekannt sein, um die theoretische Unsicherheit in der Bestimmung von $\sigma_H = \sigma_{\text{VBF}} \times B(H \rightarrow WW)$ zu beherrschen. Dies wird durch die Berechnung der QCD-Korrekturen erreicht; erste Ergebnisse dieses aufwendigen Projekts sind in [DESY 04-111] dargestellt.

Weiterhin werden die Experimente am LHC einen ersten Zugang zu den Kopplungen des Higgs-Bosons an die elektroschwachen Eichbosonen und Fermionen des Standardmodells bieten. Unter Zuhilfenahme von Modellannahmen können in einer globalen Analyse von Produktionskanälen und Zerfallsmoden für einige der Higgskopplungen Genauigkeiten im Bereich von 10% erreicht werden [DESY 04-089].

Als Folge der hohen Masse sollten mögliche Abweichungen vom Higgsmechanismus des Standardmodells bevorzugt im Top-Quark-Sektor beobachtet werden. Die Produktion von Top-Quark-Paaren ist daher auch ein interessanter Signalprozess für Präzisionsstudien. Im Rahmen der perturbativen QCD können genaue Vorhersagen über die Verteilungen der Zerfallsprodukte des Top-Quarks gemacht werden. Eine vollständige Beschreibung von hadronischer Top-Quark-Paarproduktion und -Zerfall bis zur Ordnung α_s^3 der QCD unter Berücksichtigung des Top-Quark-Spins wurde in [DESY 04-026] gegeben. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann die Produktions- und Zerfallsdynamik von Top-Quarks präzise getestet werden.

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD sagt die Existenz sogenannter Farboktettprozesse voraus, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Im Rahmen dieser Theorie wurden Vorhersagen für die assoziierte Hadroproduktion von Bottomonia ($\eta_b(nS)$, $\Upsilon(nS)$, $h_b(nP)$ und $\chi_{bJ}(nP)$) mit den neutralen Higgs-Bosonen h^0 , H^0 und A^0 des minimalen supersymmetrischen Standardmodells bereitgestellt. Dieser Erzeugungskanal, der hier erstmals untersucht wurde, liefert für kleine Massenwerte und große Werte des Parameters $\tan\beta$, der das Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der beiden Higgsdubletts misst, signifikante Wirkungsquerschnitte. Beispielsweise werden für die Signale

$\Upsilon(1S) + h^0/A^0 \rightarrow l^+l^- + b\bar{b}$ mit $m_{h^0/A^0} = 100$ GeV und $\tan\beta = 50$ am LHC etwa 3000 Ereignisse pro Jahr erwartet [DESY 04-23].

Little-Higgs-Modelle

Die Higgs-Masse im Standardmodell kann durch das Postulat einer erweiterten Symmetriestruktur erklärt werden, die mit neuen Vektorbosonen, Quarks und Skalaren im TeV-Bereich einhergeht und das Higgs-Boson als Goldstone-Boson erscheinen lässt. Viele der so konstruierten „Little-Higgs-Modelle“ sagen eine zusätzliche $U(1)'$ -Symmetrie voraus, die durch ein Z' -Vektorboson vermittelt wird.

Bei einer alternativen Realisierung der $U(1)'$ -Symmetrie würde statt des Z' ein leichtes Pseudo-Axion η im Spektrum erscheinen. An ein solches Teilchen bestehen gegenwärtig nur wenig Einschränkungen. Eine Entdeckung an zukünftigen Collidern ist aber möglich: Abhängig von den Details des Modells ist ein η -Boson am LHC über Gluon-Fusion und Zerfall in ein Photon-paar oder auch als Zerfallsprodukt der neuen schweren Quarks nachzuweisen. Am ILC kann es im e^+e^- -Modus über Abstrahlung von Top-Quarks beobachtbar sein. Im $\gamma\gamma$ -Modus würde es wiederum als Resonanz im $b\bar{b}$ -Endzustand erscheinen [DESY 04-137].

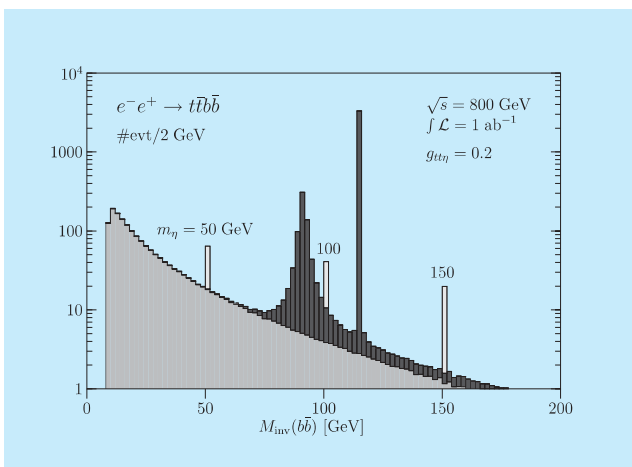


Abbildung 53: Mögliche Signale eines Pseudo-Axions η an einem e^+e^- -Linear Collider über dem elektroschwachen und dem QCD-Untergrund.

Supersymmetrie

Die Wurzeln des Standardmodells liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit im Bereich der Planck-Skala, an der die Gravitation sich mit der Teilchenphysik verbindet. Eine stabile Brücke zwischen der elektroschwachen Skala von 100 GeV und der Planck-Skala von 10^{19} GeV wird von der Supersymmetrie hergestellt. Daher müssen Methoden ausgearbeitet werden, die es erlauben, Physik-Szenarien an der Planck-Skala mittels experimenteller Resultate bei niedrigen Energien zu studieren.

Aufgrund der weitreichenden Extrapolationen muss das physikalische Bild an der elektroschwachen Skala sehr akkurat bestimmt werden. Dazu bedarf es der Verknüpfung von experimentellen Observablen mit den Wechselwirkungsparametern der Theorie. Diese Aufgabe ist systematisch für mehrere Sektoren der Supersymmetrie gelöst worden.

SUSY-Higgs-Physik

Ein wichtiger Parameter im Higgs-Sektor supersymmetrischer Theorien ist der Mischungswinkel $\tan\beta$. Wenn $\tan\beta$ den Wert von 10 überschreitet, ist es sehr schwer, diesen Parameter zu messen. Als eine überraschend gute Methode [DESY 04-077] hat sich die Messung der $\tau\tau$ -Formation von Higgs-Bosonen herausgestellt, die quadratisch mit $\tan\beta$ ansteigt. Die τ -Strahlen lassen sich durch Splitting von hochenergetischen Photonen in Collidern in großer Zahl gewinnen, so dass Genauigkeiten im Prozentbereich für große $\tan\beta$ erreicht werden können.

In CP-nichtinvarianten supersymmetrischen Theorien treten im Grenzfall hoher Massen große Mischungseffekte zwischen den schweren Higgs-Bosonen auf. Die Mischungen führen zu charakteristischen Verschiebungen der Higgs-Massen und ihrer Lebensdauern. Um diese Effekte theoretisch zu beherrschen, ist ein komplexer Mischungsformalismus in [DESY 04-055] entwickelt worden, der die resultierenden experimentellen Phänomene elegant beschreibt. Als besonders interessantes Anwendungsgebiet hat sich die Formation von Higgs-Bosonen in hochenergetischen Photon-Collidern erwiesen, bei der CP-verletzende Mischungen zu großen Asymmetrien bei Verwendung polarisierter Strahlen und in Top-Quark-Endzuständen führen.

Supersymmetrische Teilchen

Unter den supersymmetrischen Materieteilchen sind die skalaren Leptonen von besonderer Bedeutung, da ihre Eigenschaften wesentlich besser bestimmt werden können als die Eigenschaften von Squarks. Jedoch ist die Analyse von Sneutrinos wegen des Zerfalls in Endzustände, die bevorzugt unsichtbare Teilchen umfassen, schwierig. Nichtsdestoweniger konnte in [DESY 04-133] gezeigt werden, dass ein zufriedenstellendes Bild dieser Teilchen im Linear Collider aus Zerfallscharakteristiken und Produktionsraten erschlossen werden kann.

Wenn die Supersymmetrie nicht in einem minimalistischen Szenario realisiert ist, so wird eine Vielfalt von neuen Teilchen vorhergesagt, unter anderem im Sektor der Neutralinos, der Superpartner von elektroschwachen Eichbosonen und Higgs-Bosonen. Entsprechend komplex wird die theoretische Analyse. Jedoch gelingt es, in Bereichen schwacher Kopplung zwischen den supersymmetrischen Standardteilchen und den zusätzlichen neuen Teilchen analytische Approximationsverfahren zu entwickeln [DESY 04-088], mit denen solche Szenarien transparent dargestellt werden können.

SUSY-Parameteranalysen an der Planck-Skala

Kohärente Analysen supersymmetrischer Teilchen am Proton Collider LHC und am Linear Collider ILC sind notwendig, um ein umfassendes und genaues Bild des gesamten Ensembles der supersymmetrischen Teilchen zu entwerfen [DESY 04-206]. Sobald dies gelungen ist, können Extrapolationen der relevanten supersymmetrischen Parameter zur Großen-Vereinigungs-Skala und zur Planck-Skala ausgeführt werden [DESY 04-044]. Sie erlauben die Rekonstruktion der fundamentalen supersymmetrischen Theorie und ihres mikroskopischen Brechungsmechanismus. In Abbildung 54 wird dargestellt, mit welcher hoher Präzision die Massenparameter im supersymmetrischen Eichsektor bis zum Erreichen universeller Werte in minimaler Supergravitation extrapoliert werden können.

Gravitino in Supergravitationsmodellen

Ein natürlicher Kandidat für den Hauptbestandteil der kalten dunklen Materie ist in Supergravitationstheorien das Gravitino, der Superpartner des Gravitons. Im

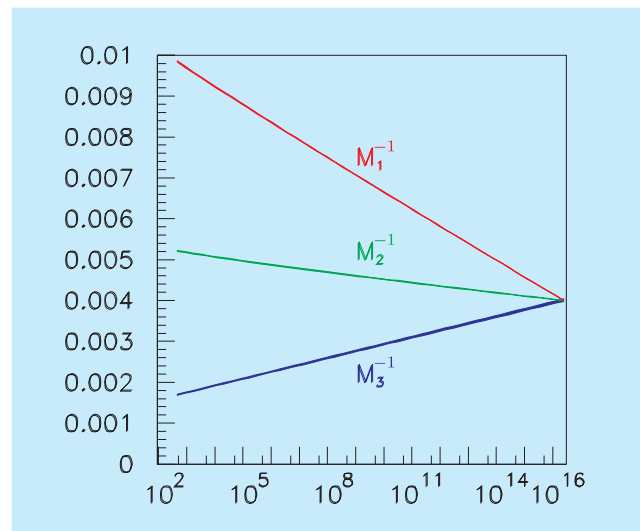


Abbildung 54: Evolution von inversen Massenparametern (in GeV^{-1}) mit der Energieskala (in GeV) bis zum Skalenbereich, in dem universelle Werte in minimaler Supergravitation vorausgesagt werden. Die Breite der Linien entspricht der erwarteten Unsicherheit aus kohärenten LHC- und ILC-Analysen.

Gegensatz zum Standardkandidaten der Supersymmetrie, dem leichtesten Neutralino, hat das Gravitino nur die extrem schwache Gravitationswechselwirkung mit anderen Teilchen. Im Hinblick auf einen möglichen experimentellen Nachweis erscheint deshalb zunächst das Neutralino bevorzugt. Aufgrund des Erfolgs der Leptogenese, dem gegenwärtig führenden Modell zur Erklärung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie, besteht seit einigen Jahren jedoch auch starkes Interesse an Modellen, in denen das Gravitino das leichteste Super-Teilchen ist. Das nächst leichteste Super-Teilchen ist dann in vielen Modellen ein quasistabiles skalares τ -Lepton, ein Superpartner des τ -Leptons. Dies führt zu sehr interessanten Möglichkeiten, das Gravitino in Experimenten am LHC und ILC zu entdecken und seine Masse, eventuell auch seinen Spin, zu messen [DESY 04-010]. Dies würde die Supergravitation als Eichtheorie bestätigen.

Split-SUSY

Es widerspricht nicht einer Vereinigung der bekannten Wechselwirkungen bei hohen Energien, wenn die zusätzlichen skalaren Teilchen in supersymmetrischen

Modellen eine Masse $m_s \gg 1$ TeV besitzen. Ein solches Spektrum, „Split-SUSY“, würde einerseits alle Schwierigkeiten mit Flavor- und CP-verletzenden Effekten beseitigen, andererseits die Voraussage dunkler Materie und des schwachen Mischungswinkels $\sin^2 \theta_w$ erhalten. Die Supersymmetrie könnte dann allerdings nicht die Hierarchie der elektroschwachen Skala stabilisieren.

Aus phänomenologischer Sicht zeichnet sich dieses Szenario durch metastabile Gluinos und moderat leichte Charginos und Neutralinos aus. Wie in [DESY 04-136] gezeigt wurde, ist die Beobachtung der Gluinos in Form von farbneutralen gebundenen Zuständen (R-Hadronen) bis zu einer Masse von 1.2–1.7 TeV am LHC möglich. Für einen Nachweis der zugrundeliegenden Supersymmetrie ist es zusätzlich erforderlich, die Mischungsmatrizen der Charginos und Neutralinos zu vermessen. Während LHC-Daten dafür nur wenig Information liefern, würde die Messung der Produktionswirkungsquerschnitte am ILC nicht nur den Rückschluss auf Supersymmetrie erlauben, sondern mit ihrer Präzision die anomalen Quantenkorrekturen durch schwere Skalarteilchen identifizieren und damit das Modell selbst etablieren.

Neutrino-physik und Kosmologie

In den kommenden zehn Jahren gehen immer größer werdende Detektoren für kosmische Strahlung (Pierre Auger Observatory, IceCube, ANITA, EUSO, SaSA) in Betrieb, welche den Nachweis extrem energetischer kosmischer Neutrinos via Neutrino-Nukleonstreuung ermöglichen. Gemäß verschiedener realistischer Flussvorhersagen dieser Neutrinos bestehen sehr gute Chancen, dass die genannten Kollaborationen in einem Jahrzehnt über Aufzeichnungen sehr vieler entsprechender Ereignisse im Energiebereich oberhalb von 10^8 GeV, entsprechend einer Schwerpunktsenergie oberhalb von 14 TeV, verfügen werden. Diese Messungen könnten Informationen über die Teilchenphysik bei Skalen jenseits der Reichweite von HERA, Tevatron und LHC liefern [DESY 04-014, 031, 180, 192]. Des weiteren eröffnen sie die Möglichkeit, den kosmischen Hintergrund von Urknallneutrinos anhand von Absorptionsmerkmalen in den Neutrino-Energiespektren nachzuweisen [DESY 03-219, 04-180]. Ein direkter Nachweis der Urknallneutrinos in einem erdgebundenen Detektor ist jedoch mit dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht

möglich, selbst wenn man die gravitative Erhöhung ihrer lokalen Dichte auf Grund der nichtverschwindenden Neutrinomasse berücksichtigt [DESY 04-147, 242].

Das Axino ist ein interessanter Kandidat für die dunkle Materie im Universum. Es trägt weder elektrische noch Farbladung, wechselwirkt nur sehr schwach und könnte das leichteste supersymmetrische Teilchen sein, welches bei Annahme von R-Paritätserhaltung stabil ist. In supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells, in denen das CP-Problem der starken Wechselwirkung durch den Peccei-Quinn-Mechanismus gelöst wird, tritt das Axino als fermionischer supersymmetrischer Partner des Axions auf. In [DESY 04-082] wurde die thermische Produktionsrate von Axinos im Rahmen der supersymmetrischen QCD berechnet. Durch Verwendung der „hard thermal loop resummation“-Methode erhält man ein endliches eichinvariantes Resultat, welches die Debye-Abschirmung im heißen Plasma aus Quarks, Gluonen, Squarks und Gluinos berücksichtigt. Daraus kann der Beitrag von thermisch erzeugten Axinos zur dunklen Materie als Funktion der Temperatur nach der Inflation berechnet werden. Es zeigt sich, dass Axinos den dominanten Anteil der dunklen Materie bilden können, wenn z. B. ihre Masse um 100 keV liegt und die Temperatur nach der Inflation etwa 10^6 GeV war.

Der Mechanismus der „Leptogenese“ führt die kosmologische Materie-Antimaterie-Asymmetrie des Universums auf Wechselwirkungen schwerer Majorana-Neutrinos in der thermischen Phase des frühen Universums zurück. Dies führt zu Vorhersagen für die Massen der leichten Neutrinos sowie ihrer schweren „Seesaw“-Partner, die in einer detaillierten Untersuchung analytisch berechnet wurden [DESY 03-100]. Die für die Leptogenese benötigte hohe Temperatur im frühen Universum schränkt in supersymmetrischen Theorien das Massenspektrum der Super-Teilchen und die Natur des leichtesten Super-Teilchens (LSP) stark ein [DESY 04-093].

In höherdimensionalen supersymmetrischen Theorien werden Eichkopplungen dynamisch durch skalare Felder bestimmt. Damit verändern sich diese unter extremen Bedingungen, insbesondere bei hohen Temperaturen. Dieser Effekt beeinflusst die Stabilität der kompakten zusätzlichen Raumdimensionen und führt damit zu einer Maximaltemperatur im frühen Universum [DESY 04-062, 216].

Vereinheitlichte Theorien

Die aufgrund experimenteller Daten naheliegende Vereinigung der Standardmodell-Eichkopplungen im Rahmen minimaler supersymmetrischer Erweiterungen ist eine der Hauptstützen der Niederenergie-Supersymmetrie und deren Einbettung in die heterotische Stringtheorie. Die Attraktivität eines solchen Szenarios für Physik jenseits des Standardmodells wird nicht zuletzt auch dadurch getragen, dass die so gefundene Vereinigungs- oder GUT-Skala (vgl. „Grand Unified Theory“) in der Nähe der heterotischen String-Skala liegt. Allerdings ist die Übereinstimmung mit der String-Skala nicht perfekt, was von vielen Theoretikern als ernstes Problem des obigen heterotischen String-GUT-Szenarios gesehen wird. Eine mögliche Lösung dieses Problems im Rahmen sogenannter Orbifold-GUTs wurde in [DESY 04-214] vorgeschlagen. Die Orbifold-GUTs, deren Entwicklung in den letzten Jahren wesentlich von der DESY-Theorie-Gruppe mitgetragen wurde, versuchen die Brechung der vereinigten Symmetrie im Rahmen höherdimensionaler Eichtheorien zu beschreiben. Im oben angesprochenen Zugang wird gezeigt, dass String-Kompaktifizierungen in stark asymmetrischen Orbifold-Geometrien auf natürliche Weise eine Trennung von String- und GUT-Skala und ein Auftreten höherdimensionaler Eichtheorien im Zwischenbereich erklären können, ohne dass es zu einer Einbuße der Präzision der Eichvereinigung kommt. Die Arbeit benutzt den geometrischen Mechanismus nichtlokaler diskreter Wilsonlinien und beinhaltet auch eine quantitative Analyse des perturbativen Regimes der zugrundeliegenden heterotischen Stringtheorie.

Orbifold-GUT-Modelle machen spezifische Vorhersagen für den Protonzerfall, die signifikant von den Vorhersagen konventioneller vereinheitlichter Theorien abweichen. Die Analyse eines von der DESY-Gruppe vorgeschlagenen SO(10)-Modells in sechs Raum-Zeit-Dimensionen ergab eine starke Unterdrückung des Zerfalls $p \rightarrow \mu^+ K^0$. Die berechnete Lebensdauer $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \simeq 1 \times 10^{35}$ Jahre liegt im Bereich der Sensitivität des geplanten Hyper-Kamiokande-Detektors [DESY 03-202, DESY 04-121]. In einer Orbifoldkompaktifizierung des heterotischen String, die das supersymmetrische Standardmodell als Niederenergielimes enthält, ergaben sich Orbifold-GUT-Modelle als Zwischenstufe [DESY 04-237]. Verschiedene theoretische

und phänomenologische Aspekte dieser interessanten Modelle werden gegenwärtig weiter untersucht.

Die oben erwähnte Eichvereinigung in String-Modellen sowie auch in rein feldtheoretischen höherdimensionalen Konstruktionen kann durch das Auftreten potenzartiger Korrekturen stark beeinflusst werden. Dieser auch als Power-Law-Running bekannte Effekt wurde, nach anfänglicher Euphorie, als nicht quantitativ kontrollierbar eingestuft. Wie nun eine detaillierte Analyse in [DESY 04-109] gezeigt hat, gibt es jedoch eine große Klasse von Modellen, in denen die Power-Law-Korrekturen aufgrund der hohen Symmetrie der fünfdimensionalen Super-Eichtheorie exakt rechenbar werden. Es wurde insbesondere ein Modell identifiziert, in dem dieser Effekt exakt mit dem gewöhnlichen 1-Loop-Laufen der Kopplungen des supersymmetrischen Standardmodells übereinstimmt. Weitere Anwendungen, insbesondere die Frage nach dem Zusammenhang mit String-Threshold-Korrekturen, sind in Arbeit.

Stringtheorie

Die Arbeitsgruppe „Stringtheorie und supersymmetrische Quantenfeldtheorien“ am II. Institut für Theoretische Physik arbeitete im Berichtszeitraum an verschiedenen Aspekten der Stringtheorie. In [Nucl. Phys. B699 (2004) 387], [Nucl. Phys. B705 (2004) 167] und [hep-th/0412277] wird die effektive Niederenergiewirkung für Calabi-Yau-Orientifold-Kompaktifizierungen mit D-Branes und Hintergrundflüssen mit Hilfe einer Kaluza-Klein-Reduktion berechnet, und es werden die teilchenphysikalischen Eigenschaften untersucht. Dabei treten insbesondere massive Tensor-Multipletts auf, die von einem supersymmetrischen Standpunkt aus in [JHEP 0411 (2004) 028], [Phys. Lett. B602 (2004) 130], [Nucl. Phys. B682 (2004) 243] und [hep-th/0410149] untersucht wurden. Diese Arbeiten legen eine interessante geometrische Verallgemeinerung der Mirrorsymmetrie von Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten in Anwesenheit von Hintergrundflüssen nahe [DESY 04-211], [DESY 04-234]. Aspekte von spontaner $N = 2 \rightarrow N = 1$ Supersymmetriebrechung in diesen Wirkungen wurde in [Class. Quant. Grav. 21 (2004) 4607] behandelt. Die Struktur der zugrundeliegenden Niederenergiewirkung einer geeichten Supergravitation mit Tensor-Multipletts wurde durch einen universellen Zugang in [Phys. Lett. B583 (2004) 338] und

[DESY 04-245] für $N = 8$ Theorien auf ein konzeptionell befriedigendes Fundament gestellt.

Die Eigenschaften von D-Branes auf gekrümmten Mannigfaltigkeiten sind aus mathematischer Sicht außerordentlich interessant und zur Zeit ein aktives Forschungsfeld. In den Arbeiten [DESY 04-054] und [DESY 04-063] werden gewristete K-Gruppen berechnet, die relevant für Eigenschaften von D-Brane-Ladungen in der Stringtheorie sind.

Die AdS/CFT-Korrespondenz führt zu interessanten Beziehungen zwischen Supergravitationstheorien und stark gekoppelten (supersymmetrischen) Eichtheorien. Diese Korrespondenz ist zwar eine Vermutung, kann aber an vielen, oft äußerst nichttrivialen Relationen überprüft werden [JHEP 0407 (2004) 058], [Phys. Rev. D70 (2004) 026005] und [DESY 04-229]. Dabei haben sich auch überraschende Zusammenhänge mit integralen Modellen ergeben [DESY 04-250].

Kosmologische Aspekte der Stringtheorie oder allgemeiner einer Quantengravitation sind durch die neuen experimentellen Beobachtungen besonders interessant. In diesem Zusammenhang wurden in [gr-qc/0411076] Gravitationstheorien, deren Lösungen einer oberen und unteren Beschränkung auf die Schnittkrümmung der Raumzeit genügen, untersucht. Für statisch sphärisch symmetrische Lösungen zeigt sich, dass Theorien mit einem Kepler-Bereich keine schwarzen Löcher produzieren.

Mathematische Physik

Eine störungstheoretische Konstruktion der Algebren von Observablen der Quantenfeldtheorie wurde auf der

Grundlage älterer Arbeiten von Steimann und Epstein-Glaser durchgeführt [hep-th/0403213]. Dabei konnte gezeigt werden, dass in einem Off-Shell-Formalismus die zeitgeordneten sowie die retardierten Produkte von Feldern so definiert werden können, dass sie mit Ableitungen vertauschen (*Action Ward Identity*). Dies ermöglicht eine lokale Definition der Renormierungsgruppe nach Stückelberg und Petermann, wie sie für die kovariante Formulierung der Quantenfeldtheorien auf gekrümmten Raumzeiten erforderlich ist. Darüber hinaus wurde eine hintergrundunabhängige Formulierung der perturbativen Quantengravitation vorgeschlagen [hep-th/0403007].

Die Versuche, Quantenfeldtheorien auch auf nichtkommutative Räume auszudehnen, führte zur Einführung sogenannter quasiplanarer Wickprodukte, die aus den (divergenten) Produkten durch Subtraktion lokaler Gegenterme entstehen [Phys. Rev. D71 (2005) 025022]. Der Verzicht auf nichtlokale Gegenterme hat allerdings starke Auswirkungen auf das Infrarotverhalten der Theorie. Diese stellen möglicherweise einen sensitiven Test für nichtkommutative Feldtheorien dar. Eine durch die Nichtkommutativität bewirkte Modifikation der Dispersionsrelation für elektromagnetische Wellen wurde mit Hilfe der Methode der kovarianten Koordinaten gefunden [Phys. Rev. D70 (2004) 107704].

Eine neue Idee, konforme Feldtheorien in höherdimensionalen Räumen einzuführen, wurde auf der Basis gruppentheoretischer Überlegungen entwickelt [hep-th/0410277].

Weiter wurden neue Aspekte des Spin-Statistik-Zusammenhangs diskutiert, und es wurde gezeigt, wie dieser Zusammenhang aus Eigenschaften der Theorie unter Spiegelungen hergeleitet werden kann [hep-th/0412060].

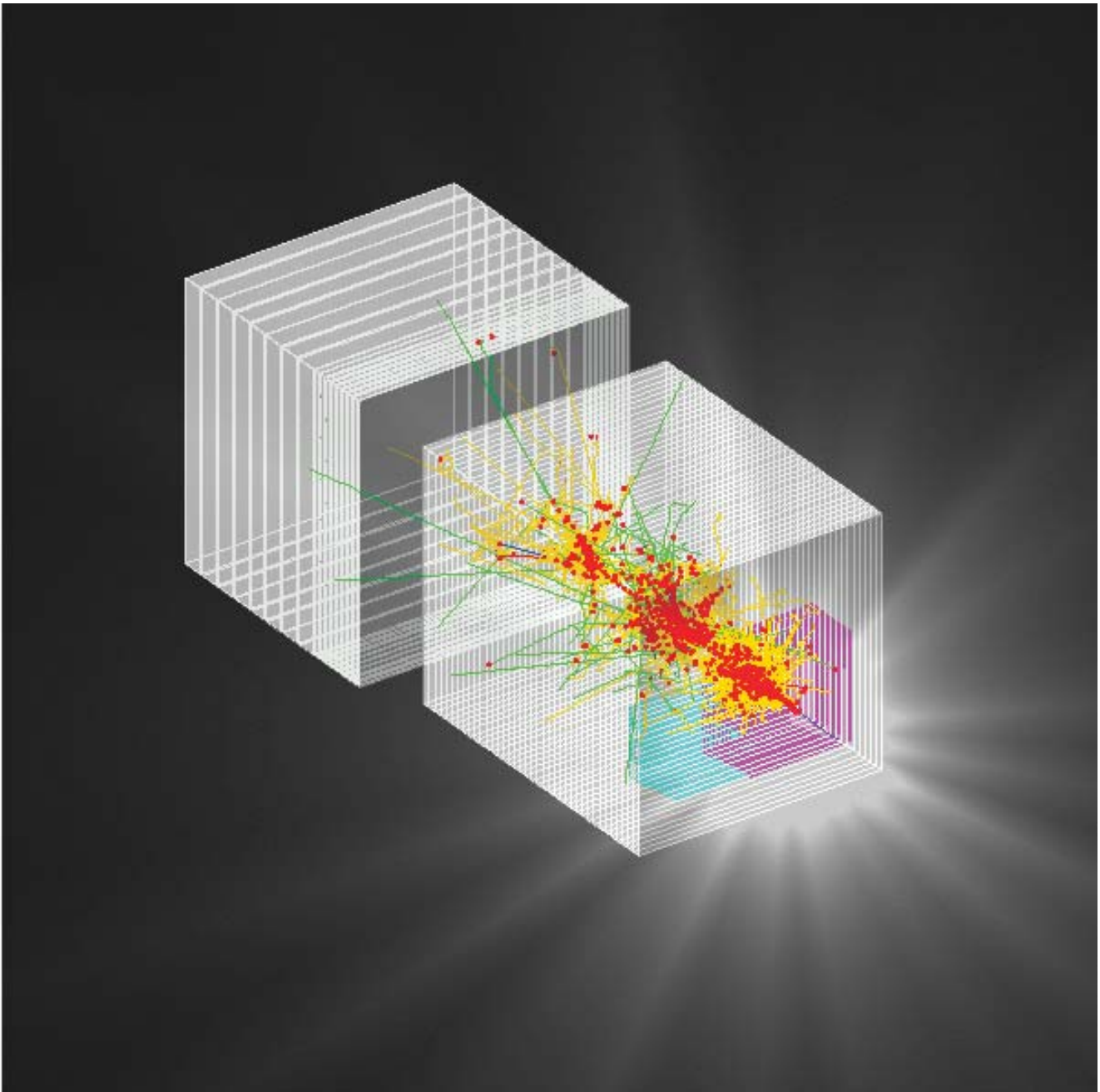


Abbildung 55: *Simuliertes Ereignis im Kalorimeter Prototypen für den ILC. Drei Detektoren – ECAL, HCAL und tail catcher, sind hintereinander angeordnet. Ein 10 GeV Pion trifft auf die Frontseite des Prototypen auf und wird im Kalorimeter absorbiert. Gezeigt werden die Monte Carlo Teilchen (Linien) und die rekonstruierten Treffer in den Kalorimetern (Punkte).*

Forschung für den International Linear Collider

ILC-Projektgruppe: Mitglieder und Gäste der Gruppen aus M (DESY, Hamburg), LC (DESY, Zeuthen – Leiter: A. Stahl (bis Okt. 2004); H.J. Schreiber (ab Okt. 2004)) und dem FH-Bereich (DESY, Hamburg), darunter insbesondere die Gruppe FLC (Leiter: T. Behnke), sowie etwa 66 Institute aus 17 Ländern (im Rahmen der ECFA Studie).

ILC-Projektleiter: T. Behnke, E. Elsen und N. Walker, DESY

Das Jahr 2004 war für den e^+e^- -Linearbeschleuniger entscheidend von der Arbeit des International Technology Recommendation Panel (ITRP) geprägt. Das von ICFA eingesetzte ITRP begann seine Arbeit Ende 2003 und verkündete nach einer Serie von Treffen in Asien, Europa und Amerika auf der Internationalen Konferenz für Hochenergiephysik (ICHEP) in Peking bereits im August 2004 seine Entscheidung. Danach soll der zukünftige Linearbeschleuniger mit der im Rahmen der TESLA Kollaboration am DESY federführend entwickelten supraleitenden Beschleunigertechnologie im L-Band betrieben werden. Die Verlässlichkeit dieser Technologie wurde vom Panel als höher eingestuft als die X-Band Beschleunigung bei höheren Frequenzen (NLC/GLC-Design). Die Notwendigkeit für eine frühe Technologieentscheidung, wie auch die Entscheidung selbst, wurde von allen Experten anerkannt. Die Einstimmigkeit der Vorgehensweise wurde bereits im November, auf dem ersten weltweiten Treffen der Maschinenexperten, eindrucksvoll demonstriert. Der Name „International Linear Collider“ (ILC) wurde für das gemeinsame Projekt vereinbart.

Gruppen des DESY waren an zentraler Stelle im Entscheidungsprozess des ITRP beteiligt und stellten dem Komitee Materialien zum kalten Beschleuniger und zum Experimentieren an einer kalten Maschine zur Verfügung. Im Sommer 2004 wurde eine von der Europäischen Union geförderte und von DESY koordinierte Design-Studie (EUROTeV) zum Linearbeschleuniger bewilligt. Diese Studie vereint

28 Labors in Europa bei der Forschung zur Optimierung des Beschleunigers und der Weiterentwicklung des Projekts zur Entscheidungsreife und hat bei einer Laufzeit von drei Jahren einen finanziellen Rahmen von mehr als 27 Millionen €. Gleichfalls im November des Jahres wurde bei DESY eine ILC-Projektgruppe installiert, die bereichsübergreifend, die Tätigkeiten für den ILC bei DESY koordiniert. Darin eingeschlossen sind die in den Vorjahren begonnenen Arbeiten zur Entwicklung neuer, anspruchsvoller Detektortechnologien und verschiedene Studien zur Physik am ILC. Diese Untersuchungen fanden im Rahmen der ECFA Studie zur Physik und dem Detektor an einem Linearbeschleuniger statt.

Im Folgenden werden die Aktivitäten zu diesem Thema für die beiden DESY Standorte Hamburg und Zeuthen zusammengefasst und erst am Ende des Abschnitts nach Standorten aufgeschlüsselt.

Physikstudien für den ILC

Physikstudien für den ILC konzentrieren sich auf folgende Themen:

- LHC/ILC-Arbeitsgruppe
- Präzisionsanalysen von supersymmetrischen Modellen
- Präzisionsanalysen von Higgs-Bosonen

- Einfluss der Zeitstruktur der Linear Collider Strahlen auf die Physikanalyse

In der seit 2003 laufenden ECFA-Studie spielt die DESY Gruppe weiterhin eine führende Rolle. Auf dem internationalen Linear Collider Workshop LCWS'04 in Paris wurden zahlreiche Beiträge der Gruppe vorgestellt.

Die Zielsetzungen der obengenannten Themenbereiche sowie aktuelle Beiträge der Gruppe werden im Folgenden erläutert.

LHC/ILC-Arbeitsgruppe

Ziel der internationalen LHC/ILC-Arbeitsgruppe ist es, an konkreten Beispielen zu untersuchen, wie sich der LHC und der ILC gegenseitig ergänzen. Hierbei arbeiten Experimentalphysiker am ILC und am LHC sowie Theoretiker eng zusammen. Der erste Bericht dieser Arbeitsgruppe ist 2004 erschienen.

Higgs-Boson: In supersymmetrischen Modellen unterscheidet sich das leichteste neutrale Higgs-Boson häufig nur geringfügig von dem des Standardmodells. Die schwereren supersymmetrischen Higgs-Bosonen liegen oft außerhalb der kinematischen Reichweite des ILC. Da auch am LHC diese Teilchen nicht immer beobachtet werden können, ist es besonders wichtig, indirekte Information über die Massen der schweren neutralen Higgs-Bosonen, insbesondere über das CP-ungerade A^0 , zu erhalten. In früheren ILC-Studien wurde gezeigt, dass die Verzweigungsverhältnisse des leichten Higgs-Bosons h vom Massenwert M_A des A^0 abhängen. Allerdings hängt diese Masse auch vom Spektrum der supersymmetrischen Teilchen, insbesondere der dritten Generation, ab. Unter diesen sind die Squarks am einfachsten am LHC zu beobachten. Weiterhin spielt die genaue Messung der Top-Masse am ILC eine wichtige Rolle. In einer neuen Studie, die von Physikern der Gruppe FLC zusammen mit dem Weizmann Institut in Israel, der TU München und dem IPPP in Durham durchgeführt wurde, wurde nun erstmals das Zusammenspiel der verschiedenen sensitiven Observablen untersucht. Nur durch Verwendung der Messungen von ILC und LHC zusammen lässt sich die A^0 -Masse einschränken. Für eine A^0 -Masse von 800 GeV erreicht man eine Genauigkeit von etwa 30% (siehe Abb. 56).

Im Jahr 2004 konzentrierten sich die Studien auf Fragen, ob und wie gut es möglich ist, die verschiedenen neutralen Higgs-Bosonen des Minimalen Supersymmetrischen Standardmodells (MSSM) im Regime intensiver Kopplungen zu erkennen und deren Eigenschaften zu vermessen. Im Vergleich mit dem LHC ist ein Linear Collider eindeutig besser zur Bestimmung des Profils solcher Teilchen geeignet. Insbesondere ist eine Differenzierung der drei möglichen neutralen Higgs-Bosonen beim ILC möglich und ihre Massen sind mit Genauigkeiten von 100 bis 500 MeV bestimmbar.

SUSY: Die Studien zu Präzisionsanalysen supersymmetrischer Modelle wurden in 2004 weiter fortgeführt. So ist es erstmals gelungen, zu zeigen, dass die Parameter des MSSM aus den Observablen von ILC und LHC in einem globalen Fit extrahiert werden können. Im Gegensatz zu früheren Studien zur Parameterbestimmung wurden Korrekturen höherer Ordnung berücksichtigt. Diese führen dazu, dass sich die einzelnen Sektoren des Modells nicht mehr unabhängig behandeln lassen. Es wurde ein neues Fit-Programm (Fittino) entwickelt, das experimentelle und theoretische Unsicherheiten sowie deren Korrelationen berücksichtigt und die Parameterbestimmung ohne a-priori-Annahmen durchführt. Aufgrund der großen Anzahl von Parametern kommen herkömmliche Fit-Algorithmen an ihre Grenzen. Ein neuer thermodynamisch inspirierter Algorithmus (simulated annealing) wurde erstmals für solche Zwecke eingesetzt und liefert stabile Ergebnisse. Es wurde gezeigt, dass sich in den untersuchten Szenarien das richtige globale Minimum erreichen lässt und dass die Fehlerbestimmung der Parameter zuverlässig ist.

Stop: Untersuchungen zur Messung der Masse des supersymmetrischen Top-Quarks (Stop) wurden gemeinsam mit der Universität Lancaster durchgeführt. Dabei wurden vier verschiedene Methoden angewendet, um Masse und Mischungswinkel des Stops zu bestimmen. Eine präzise Messung der Wirkungsquerschnitte bei verschiedenen Polarisationszuständen der Elektron- und Positronstrahlen ergibt die höchste Genauigkeit von 0.57 GeV für die Stop-Masse. Eine Messung der Wirkungsquerschnitte nahe der Erzeugungsschwelle von skalaren Tops gestattet es, die Masse auf 1.2 GeV genau zu bestimmen. Weiterhin wurde versucht, die Stop-Masse aus den Eigenschaften der Charm-Jets zu bestimmen. Beide hier angewandten Methoden ergaben eine Genauigkeit von etwa 1.5 GeV.

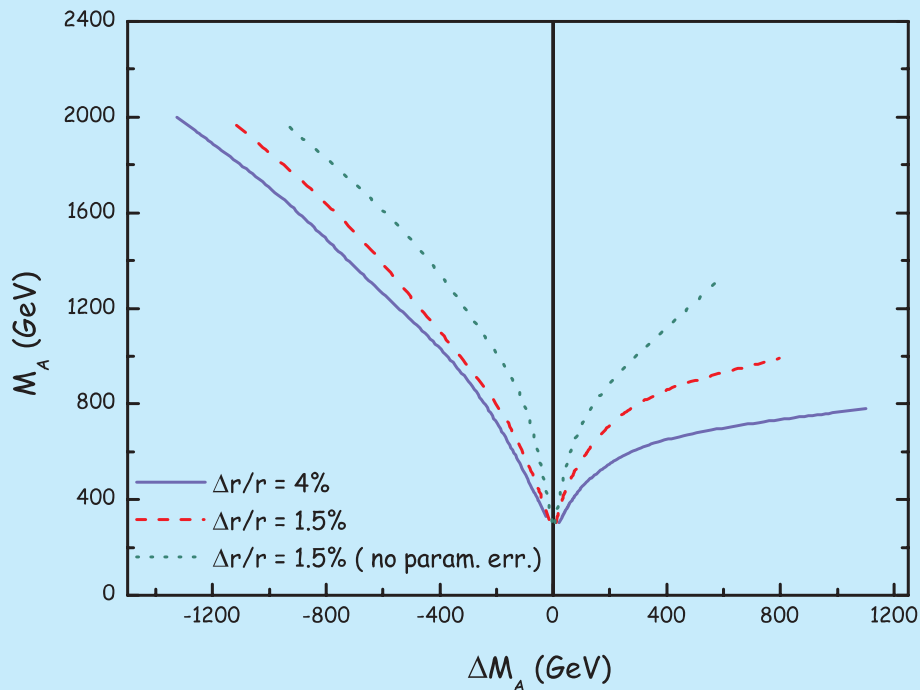


Abbildung 56: Die Variation ΔM_A des Messwertes der Masse M_A des A^0 als Funktion von M_A abgeleitet aus der Präzisionsmessung von Verzweigungsverhältnissen am ILC ($r = [BR(h \rightarrow b\bar{b})/BR(h \rightarrow WW)]_{obs}/[BR(h \rightarrow b\bar{b})/BR(h \rightarrow WW)]_{SM}$). Die durchgezogene Linie bezieht sich auf eine r -Präzision von 4% (möglich bei ILC500), die gestrichelte Linie auf 1.5% (ILC500 + ILC1000). Die Unsicherheiten der MSSM-Vorhersage aufgrund der anderen MSSM-Parameter, die sich aus den Fehlern der LHC/ILC-Messungen der SUSY-Teilchen (insbesondere Squark-Massen) ergeben, sind berücksichtigt. Die gepunktete Linie zeigt die Genauigkeit, die erreichbar wäre, wenn die Eigenschaften der SUSY-Teilchen exakt bekannt wären.

Präzisionsanalysen von Higgs-Bosonen

Zu den seit langem bekannten Stärken des ILC gehört die Möglichkeit ein standardmodellartiges Higgs-Boson detailliert zu untersuchen. Die Messung der Masse und der Verzweigungsverhältnisse eines leichten Higgs-Bosons stellen hierbei Referenzanalysen dar, deren Untersuchung die Entwicklung

des Detektordesigns ständig begleiten. In 2004 wurden Untersuchungen zum systematischen Fehler der Higgs-Massenbestimmung aufgrund der Unsicherheiten der Strahlparameter (Energiekalibration, Energieprofil, Beamstrahlung) durchgeführt. Es zeigt sich, dass Energieprofil und Beamstrahlung nur einen kleinen Einfluss auf die Genauigkeit der Massenbestimmung haben, vorausgesetzt, die geplante Maschinenpräzision wird eingehalten und die Beamstrahlung wird aus

der Akoplanarität von Bhabha-Ereignissen bestimmt. Die absolute Energiekalibration überträgt sich in etwa 1:1 auf die Präzision der Higgs-Masse. Bei einer gewünschten Unsicherheit von weniger als 40 MeV für eine Higgs-Masse von 120 GeV ergibt sich hieraus eine Anforderung für die Energiekalibration von $3 \cdot 10^{-4}$.

Die Analyse der hadronischen Verzweigungsverhältnisse eines leichten Higgs-Bosons wurde weiter vervollständigt und als Referenzanalyse auf dem LCWS'04 vorgestellt. Frühere Unstimmigkeiten in der Literatur über die erreichbare Präzision konnten aufgeklärt werden. Im Vergleich zu den im TESLA-TDR vorgestellten Ergebnissen zeigt sich, dass der Fehler auf das Verzweigungsverhältnis in b-Quarks reproduziert werden konnte, während die Fehler für Charm-Quarks und Gluonen etwa 50% (relativ) größer sind. Der Grund liegt vor allem in einer wesentlich realistischeren Simulation der Rekonstruktion sekundärer Zerfallsvertices.

Wenn kein leichtes Higgs-Boson existiert, werden die Eichkopplungen bei Energien in der Nähe von $\sqrt{s} \sim 1$ TeV stark. Dieses Szenario wurde an Hand der WW Streuung detailliert untersucht. Auch hier ist der ILC dem LHC auf Grund der eindeutig identifizierbaren Subprozesse bei ausreichend hoher Luminosität überlegen.

Einfluss der Zeitstruktur der Linear Collider Strahlen auf die Physikanalyse

In Vorbereitung der ITRP-Entscheidung wurde im Herbst 2004 an Beispielen untersucht, wie sich die unterschiedlichen Zeitstrukturen der beiden Beschleunigertechnologien auf die erreichbare Präzision von Observablen aus der Higgs-Physik auswirken.

Die Zeitstruktur der kollidierenden Teilchenbündel (Bunches) unterscheidet sich für einen auf TESLA-Technologie basierenden Linear Collider deutlich von dem normalleitenden NLC/GLC-Design. So folgen im NLC/GLC-Design Bunches im Abstand von 1.4 ns, während dies im TESLA-Design mit 180–340 ns geschieht. Während letzteres für moderne Detektoren kein Problem darstellt, ist es eine Herausforderung Ereignisse im Abstand von 1.4 ns zu separieren. Sollte dies technologisch nicht möglich sein, so integriert der Detektor Untergrund aus aufeinanderfolgenden Bunch-Crossings. In der Gruppe FLC wurde zur Vorbereitung

der Technologieentscheidung studiert, welchen Einfluss ein solcher integrierter Untergrund auf die Rekonstruktion von Higgs-Ereignissen in verschiedenen Endzuständen haben kann. Als Untergrund wurde vor allem die Produktion von Hadronen aus der Kollision hochenergetischer Beamstrahlung-Photonen untersucht. Im Mittel werden in etwa 0.4/0.27 (TESLA/NLC) solcher Ereignisse pro Bunch-Crossing erwartet, die jeweils zu einigen Hadronen im Detektor führen. Wird ein solcher Untergrund über mehrere Bunch-Crossings integriert, führt die zusätzliche Energiedeposition zu einer Verschlechterung der Massenauflösung und der Trennbarkeit von Higgs-Ereignissen von anderen Physik-Ereignissen. Es wurden Algorithmen entwickelt, mit deren Hilfe der Einfluss dieses hadronischen Untergrundes minimiert wird. Dennoch zeigt sich eine signifikante Verschlechterung der Massenauflösung für ein leichtes Higgs-Boson im Higgs-Strahlung-Prozess und ein schlechteres Signal-zu-Untergrund Verhältnis in WW-Fusion wenn der Detektor über 18 Bunch-Crossings (etwa 25 ns für NLC/GLC-Design) integriert.

Beschleuniger Entwicklungen

Die Forschungsarbeiten zum Linear Collider im Jahr 2004 sind eng mit den Arbeiten der TESLA-Kollaboration und der Vorbereitung für den XFEL verbunden. Der Schwerpunkt in der ersten Hälfte des Jahres lag in der Vorbereitung der Technologie-Entscheidung. Anfang April besuchte das ITRP-Experten-Gremium DESY, um sich vor Ort über den Stand der Entwicklungen zu informieren. Die TESLA-Kollaboration hatte zu diesem Ereignis sowohl externe Mitglieder der Kollaboration als auch die Vertreter der beteiligten oder interessierten Industriefirmen eingeladen. In Plenarvorträgen, wie auch in detaillierte Posterausstellungen, hatte das Gremium Gelegenheit, sich zu informieren und Kontakt mit den Experten aufzunehmen. In Folgetreffen an den Standorten der anderen Labors war DESY durch Experten jeweils vertreten und konnte dem Gremium Rede und Antwort stehen. Die behandelten Themen sind im Detail weiter unten aufgeführt.

Im März 2004 hatte ein Konsortium bestehend aus mehr als zwanzig europäischen Labors unter Federführung von DESY eine Design-Studie bei der Europäischen Union eingereicht, um die Forschung für



Abbildung 57: Die Beschleunigerexperten aus aller Welt treffen sich beim ersten ILC-Workshop am KEK-Labor in Japan.

den Linearbeschleuniger voranzubringen. Dieser so genannte EUROTeV Vorschlag umschließt in seinem Arbeitsprogramm viele der unten aufgeführten Themen mit Ausnahme der „supraleitenden Technologie“, die bereits in der EU-geförderten „Joint Research Activity“ zur Superconducting RF (SRF) als Teil des „CARE“-Förderprojektes abgedeckt ist. Der EUROTeV-Vorschlag wurde zusammen mit dem ebenfalls unter DESYs Federführung eingereichten Vorschlag EUROFEL von den Gutachtern auf die beiden ersten Plätze unter mehr als Hundert eingereichten Vorschlägen gesetzt und zur Förderung von der europäischen Union ausgewählt. DESY selbst gewinnt auf diese Weise sechs Nachwuchswissenschaftler zur Forschung am ILC. Gleichzeitig intensiviert das Projekt die internationale Zusammenarbeit am Linear Collider. In einem Kick-Off Meeting Ende November am DESY wurde das Projekt der Öffentlichkeit vorgestellt und das detaillierte Programm besprochen. Auszüge aus dem Arbeitsprogramm von EUROTeV finden sich in den aufgeführten Abschnitten wieder.

Im November wurde bei DESY die ILC-Projektgruppe mit der Aufgabe gegründet, die ILC spezifischen Aktivitäten bei DESY zu koordinieren und die bestmögliche Synergie mit den TTF- und XFEL-Projekten herzustellen. Die Bedeutung von TTF und XFEL für den ILC ist außerordentlich. Ein Erfolg des XFEL ist nach der Entscheidung für die kalte Technologie unabdingbar und umgekehrt gibt es viele originäre Beiträge aus dem Feld des ILC, die für den XFEL interessant werden. Es ist abgeschätzt worden, dass etwa 90% der XFEL-

Arbeitsfelder (unter Einschluss der Industriearbeiten) direkt relevant sind für den ILC. Unter diesem Licht hat beispielsweise die TESLA-Kollaboration auf ihrem Treffen in Orsay im Herbst 2004 beschlossen, die Arbeit mit Konzentration auf die kalte Beschleuniger-Technologie weiter zu führen. Experimentelle Grundlage bleibt der Weiterbetrieb der TTF (TTF II), der DESY eine federführende Rolle in der Kollaboration einräumt.

Ebenfalls im November fand der erste ILC-Workshop am KEK in Japan statt, auf dem auch DESY gut vertreten war (siehe Abb. 57). Dieser Workshop demonstrierte eindrucksvoll das große internationale Interesse und den Willen, nach der Wahl der Beschleuniger-Technologie, die Realisierung des Projektes gemeinsam im internationalen Umfeld anzugehen.

Entwicklung der supraleitenden Technologie

Die TESLA-Kollaboration hat bereits Kavitäten mit Gradienten von mehr als 35 MV/m hergestellt und betrieben. Die gegenwärtig bei ZANON in der Entwicklung befindlichen Kavitäten werden die bisher kleine Produktionsstatistik verbessern. Der Test neun solcher Kavitäten in einem Kryostaten bei gleichem mittleren Gradienten konnte wegen fehlender Infrastruktur bisher nicht im Teilchenstrahl erfolgen. Das Modul 6 ist für solche Tests an der TESLA Test Facility (TTF) vorgesehen. Solche Kavitäten ermöglichen den Betrieb

des VUV-Lasers mit Elektronenenergien jenseits von 1 GeV und den Betrieb des XFEL bei kleinsten Wellenlängen oder wegen Verminderung der Verlustleistung bei höherer Bunchrate.

Schlüsselfrage bei der Begutachtung durch das ITRP war die Frage nach der weiteren Industrialisierung des Herstellungsprozesses. Die Erwartung ist, dass durch noch weiter verbesserte Produktionsprozesse die Qualität der Module gesteigert werden kann, so dass aufwändige Tests entfallen. Die Behandlung durch „Electro-Polishing“ scheint viele Qualitätsanforderungen in diesem Zusammenhang zu erfüllen und wird für die Herstellung der Kavitäten mit hohem Gradienten benutzt. Neben diesem Basisprogramm zur Konsolidierung des Produktionsprozesses beteiligt DESY sich aktiv an der Entwicklung von Kavitäten mit noch höherer Beschleunigungsspannung in Zusammenarbeit mit Experten aus Japan und USA.

Die außerordentliche Güte der Kavitäten bei hoher Beschleunigungsspannung lässt sich nur dann effizient zur Beschleunigung ausnutzen, wenn der Verstimmung der Kavitäten aufgrund der Lorentzkraft entgegengewirkt wird. Bei TESLA sind Piezo-Tuner in der Entwicklung, die dynamisch der Deformation beim „Füllen“ der Kavität entgegenwirken. Die Herstellung dazu passender, höchstintegrierter Steuerelektronik ist Aufgabe der LLRF Gruppe bei DESY, während die mechanischen Tuner in Zusammenarbeit mit Saclay entwickelt werden.

Dämpfungsringe

Der lange Pulszug beim ILC von 1 ms macht es erforderlich, dass die einzelnen Pakete in den Dämpfungsringen eng gepackt werden. Im TESLA-Vorschlag wurde ein so genanntes „Dog-bone“-Konzept entwickelt, bei dem die Dämpfungsringe zum Teil im langen Beschleunigertunnel aufgebaut sind. Andere Konzepte mit kreisförmigen Dämpfungsringen von 6 oder sogar nur 3 km Umfang werden ebenfalls diskutiert. Solche Vorschläge erfordern jedoch extrem schnelle „Kicker“ für die Ejektion der Pakete. Grundlage der weiteren Diskussion bleibt deshalb gegenwärtig das Konzept aus dem TESLA-Vorschlag.

Weiteres Studium scheint auch notwendig für den so genannten „Electron-Cloud“-Effekt, bei dem sich heraus-

geschlagene Elektronen auf der Strahlachse akkumulieren und die dicht nachfolgenden Bündel beeinflussen, so dass die Strahlemittanz bereits im Dämpfungsring leidet. Dieser Effekt wird gleichsam für LHC von Bedeutung sein und stellt ein spezielles Forschungsthema dar, das auch von EUROTeV behandelt wird.

Strahldynamik und Physik

Die gute Emittanz der Strahlen nach den Dämpfungsringen kann in den Bunch-Kompressoren, im eigentlichen Linac und im Strahlzuführungssystem beeinflusst werden. Hier ist es notwendig, durch robuste Algorithmen die Optimierung des Strahls zu erreichen. Ausschlaggebend sind hier Feedback-Systeme, die von Puls zu Puls die Strahlage nachsteuern. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch der Einfluss von Bodenbewegungen, die bei vertikalen Strahlabmessungen von einigen Nanometern aktiv kompensiert werden müssen.

Positronenquelle

Nach einem Vorschlag von Beschleuniger Experten aus Protvino (Russland) war im TESLA Technical Design Report die Erzeugung der Positronen aus einem hochenergetischen Elektronenstrahl in einem Undulator vorgesehen. Gegenüber konventionellen Vorschlägen mit einem Festkörper-Target gewinnt man hier vor allem wegen der geringeren Materialbelastung im dünnen Target. Gleichzeitig ist es möglich, auch den Positronenstrahl longitudinal zu polarisieren.

Intensive Vorstudien hierzu wurden im Experiment E166 am SLAC, USA, aufgenommen, das weiter unten beschrieben ist. Für die Verwendung am ILC muss gleichzeitig die Ausweitung des Konzeptes auf einen 100-fach längeren Undulator berücksichtigt werden und der Transport des Spins über die lange Strecke von Erzeugung über Dämpfungsring bis zum Kollisionspunkt betrachtet werden.

Global Accelerator Network

Der Bau des ILC erfordert neue Wege der internationalen Zusammenarbeit. Anders als bei früheren Großprojekten der Teilchenphysik, werden für den ILC technisch anspruchsvolle Komponenten weit entfernt vom

Standort des Beschleunigers entwickelt und gebaut. Selbst die Expertise zum Betrieb der Komponenten wird großteils nur aus der Entfernung abrufbar sein. Unabdingbar für eine solche Betriebsweise sind deshalb Kommunikationsmittel, die den „Live“ Eindruck der Beschleunigerkomponente entfernt übermitteln. Im EUROTeV Projekt ist deshalb die Entwicklung eines virtuellen Labors vorgesehen, das Messgrößen standardisiert aufnimmt und in Echtzeit übermittelt.

Gleichzeitig bemühen sich diese Experten um die Verbreitung der audiovisuellen Kommunikationsmittel. Ziel ist hier aus dem sich schnell entwickelnden Marktangebot die geeignete Lösung herauszusuchen.

Verfügbarkeit des Beschleunigers

Die hohe Zahl von Komponenten für den Beschleuniger beeinflusst dessen Betriebsverhalten und Einzelausfälle könnten die integrierte Luminosität empfindlich schmälern. Es ist deshalb notwendig, die Schwachstellen zu identifizieren und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Wegen der großen Zahl an Komponenten sind hier Untersuchungsmethoden angemessen, die auf statistische Methoden bei der Modellierung der Ausfälle zurückzugreifen. Solche Modelle sind insbesondere bereits in Amerika für vergleichende Studien der verschiedenen Beschleunigerkonzepte eingesetzt worden. Die Fragen haben Auswirkungen auf zukünftige Designentscheidungen, bei denen u. a. ein zweiter Tunnel als Servicetunnel mit schnellerem Zugang diskutiert wird. Der TESLA-Vorschlag favorisiert einen Ein-Tunnelvorschlag, in dem der Linac an der Tunneldecke angebracht wird. Eine solche Lösung erlaubt relativ ungehinderten Zugang zum Beschleuniger, allerdings nur in den Betriebspausen.

Detektorentwicklungen

Auch im Jahre 2004 wurden an beiden DESY Standorten intensive Arbeiten zur Entwicklung von Detektoren für einen Linearbeschleuniger durchgeführt. Die Hauptgebiete sind: strahlnahe Kalorimetrie (Zeuthen), hadronisches Kalorimeter (Hamburg), Zeit-Projektionskammer (Hamburg) und MAPS-Pixel Detektoren (Hamburg). Darüber hinaus arbeitet DESY am

Experiment zur Entwicklung einer polarisierten Positronenquelle mit (E166, in Zeuthen und in Hamburg) und entwickelt präzise Strahllagemonitore, die für einen Einsatz in einem Energiespektrometer gedacht sind (Zeuthen).

F&E für strahlnahe Kalorimeter eines ILC Detektors

In der strahlnahen Region des ILC Detektors sind zwei Kalorimeter vorgesehen, welche extremen Anforderungen genügen müssen und daher intensive Grundlagenforschung erfordern. Das BeamCal, welches direkt an der Strahlröhre anliegt und einen Polarwinkel von 4 bis 28 mrad überdeckt, muss unter sehr hoher Strahlenbelastung funktionstüchtig bleiben. Elektronen und Positronen der „Beamstrahlung“ deponieren eine Dosis von etwa 10 MGy pro Jahr. Das sich radial anschließende LumiCal bei Polarwinkeln zwischen 26 und 82 mrad ist ein Instrument zur präzisen Luminositätsmessung.

Eine eigene Kollaboration für Kalorimetrie in Vorwärtsrichtung (FCAL) erarbeitet ein technisches Design für beide Kalorimeter. Im Berichtszeitraum wurden umfangreiche Monte Carlo Rechnungen zur Optimierung der Strukturen durchgeführt. Parallel dazu wurden Sensor Prototypen getestet und Vorbereitungen für den Aufbau von Prototypen der Kalorimeter getroffen.

Die Verteilung der Beamstrahlung im Bereich des BeamCal kann zur Strahldiagnose und Korrektur genutzt werden. Einzelne hochenergetische Elektronen müssen bis zu kleinsten Polarwinkeln erkannt werden, da diese sonst zum Untergrund bei der Suche nach neuen Teilchen beitragen. Für diese Zwecke muss das innere Kalorimeter sehr kompakt sein und eine hohe Granularität besitzen. Mögliche Varianten sind ein Diamant-Wolfram Sandwich Kalorimeter oder ein Kalorimeter aus Szintillatorkristallen. Die Segmentierung der Sensoren oder Kristalle wurde nach Monte Carlo Studien festgelegt.

Diamant-Sensoren, die das Fraunhofer Institut für angewandte Festkörperphysik in Freiburg angefertigt hat, wurden in einem Teststrahl in einem großen Intensitätsbereich untersucht. Ein Sensor der Größe $12 \times 12 \text{ mm}^2$ ist in Abb. 58 gezeigt. Linearität und Homogenität

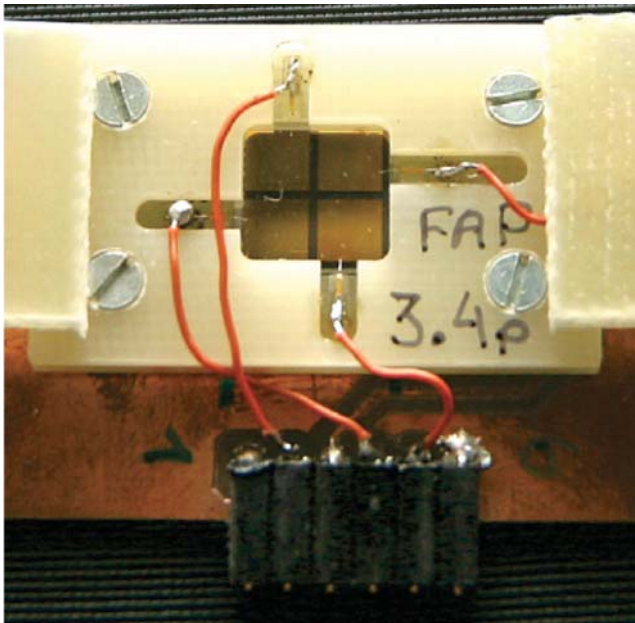


Abbildung 58: Ein Diamantsensor für Untersuchungen im Teststrahl. Die Elektrode besteht aus vier Teilflächen etwa der Größe, die für das Kalorimeter optimal ist. Jede Teilfläche wird separat ausgelesen.

wurden getestet. Die vorläufigen Resultate sind sehr zufriedenstellend.

Aus Plastik-Szintillatoren wurden Segmente gefertigt, welche etwa den Abmessungen der Kristalle im BeamCal entsprechen, mit optischen Fasern zur Lichtauskopplung versehen und zu einem Mini-Modul zusammengesetzt. Die Lichtmenge vom Durchgang kosmischer Myonen wurde direkt am Szintillator und am Ende der optischen Faser gemessen. Etwa 10% des Lichtes wird ausgekoppelt. Das ist ausreichend für die Anwendung im Kalorimeter.

Für das Design des LumiCal wurden detaillierte Monte Carlo Rechnungen von anderen Partnern der FCAL Kollaboration durchgeführt. Auf deren Grundlage wurde in Zeuthen ein mechanisches Design entwickelt, welches in Abb. 59 gezeigt ist.

Die Position der Sensoren muss mit einer Präzision von einem Mikrometer kontrolliert werden. Deshalb sind getrennte Halterungen für die Sensoren und die Absorberringe notwendig.

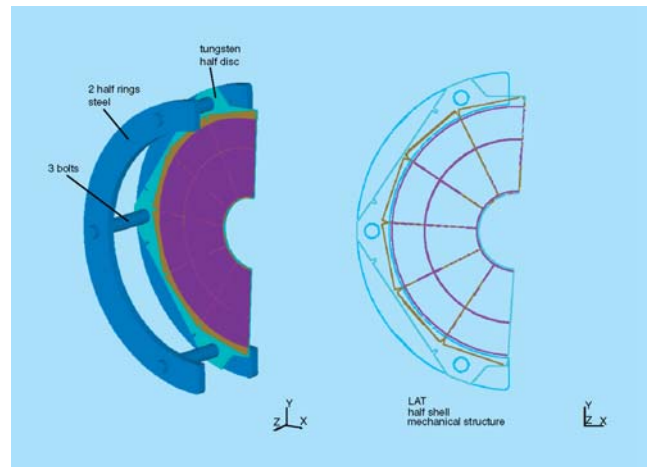


Abbildung 59: Der mechanische Aufbau des LumiCal. Die linke Figur zeigt die Aufhängung eines Sensormoduls. Auf der rechten Seite ist der Aufbau eines Sensormoduls aus mehreren Silizium Sensoren gezeigt.

F&E für ein hadronisches Kalorimeter am ILC

Bei vielen Schlüsselreaktionen am Linear Collider werden schwere Bosonen, z. B. W, Z oder Higgs-Teilchen erzeugt, die ihrerseits überwiegend in Jets zerfallen. Die zugrundeliegende Physik im Energiebereich des ILC erschließt sich aus der präzisen Vermessung solcher Prozesse. Die schweren Teilchen können in den Multi-Jet-Endzuständen nur anhand ihrer invarianten Massen identifiziert werden. Dazu müssen die Energien der Jets sehr genau gemessen werden, und zwar wesentlich genauer, als dies mit bisher gebauten Detektoren an Beschleunigern möglich ist. Diese Forderung ergibt sich unter anderem direkt aus den Massenwerten der schweren Bosonen bzw. deren Abstand voneinander. Die Physikstudien der vergangenen Jahre haben hier eine gewaltige Herausforderung an die Detektorentwicklung aufgezeigt.

Im Prinzip kann die nötige Präzision erreicht werden, wenn jedes Teilchen im Ereignis einzeln im Detektor nachgewiesen und mit der Komponente gemessen wird, die dafür am besten geeignet ist: also geladene Teilchen mit dem Spurdetektor, und neutrale im Kalorimeter. Bei dieser „particle flow“ genannten Methode müssen die Teilchensignale im Kalorimeter räumlich voneinander

getrennt werden. Die Trennung ist umso erfolgreicher, je stärker das Magnetfeld ist, das die geladenen Teilchen von der Jet-Richtung ablenkt, je weiter entfernt vom Wechselwirkungspunkt die Teilchen auf das Kalorimeter treffen, und je feiner dessen Granularität ist. Dem stehen offensichtliche technische und budgetäre Grenzen gegenüber; der Auslegung der Magnetspule und des Kalorimeters kommt eine besondere Bedeutung bei der sorgfältigen Optimierung des Detektorkonzepts zu.

Die Gruppe FLC arbeitet zusammen mit Partnerinstituten in Frankreich, Großbritannien, Russland, den USA und Tschechien im Rahmen der CALICE-Kollaboration an der Entwicklung eines hadronischen Kalorimeters (HCAL) mit Eisen als Absorber und Szintillatorauslese. Dank neu entwickelter Photodetektor-Technologien können hier deutlich kleinere Auslesezellen als früher realisiert werden. Winzige, 1 mm^2 messende Halbleiterdetektoren, „Silizium-Photomultiplier“ (SiPM), die auf einem kurzen Wellenlängenschieber direkt auf die Szintillatorplättchen montiert werden, übernehmen dabei die Rolle der vormals verwendeten Vakuum-Photovervielfacher, zu denen das Szintillationslicht über komplizierte Lichtleitersysteme aus dem Detektorvolumen herausgeführt werden musste.

In einem „particle flow“-Kalorimeter spielt die Ortsauflösung eine mindestens genauso große Rolle wie die Energieauflösung. Diese Gesichtspunkte auszubalancieren ist eines der Ziele des Entwicklungsprogramms. In einer radikaleren Variante kann sogar auf die Amplitude der Kalorimetersignale ganz verzichtet werden: das „digitale Kalorimeter“ misst die Energie durch Zählen der Treffer in sehr feiner (1 cm^2) Segmentierung. Für diesen Ansatz kommen auch Gas-Detektoren als Auslesemittel in Frage, eine Option, die von anderen Gruppen in CALICE untersucht wird.

Für dieses Programm ist der Bau von Kalorimeter-Prototypen für Teststrahlexperimente unverzichtbar. Zum einen müssen die neuen Technologien über den Labormaßstab hinaus und unter realistischen Bedingungen erprobt werden, zum anderen sind die Modelle, die der Computersimulation hadronischer Schauer zugrundeliegen, zu ungenau, als dass die Optimierung eines „particle flow“-Kalorimeters sich darauf stützen könnte. Daten von elektronischen und hadronischen Teststrahlen sind nicht zuletzt nötig, um das Konzept überhaupt

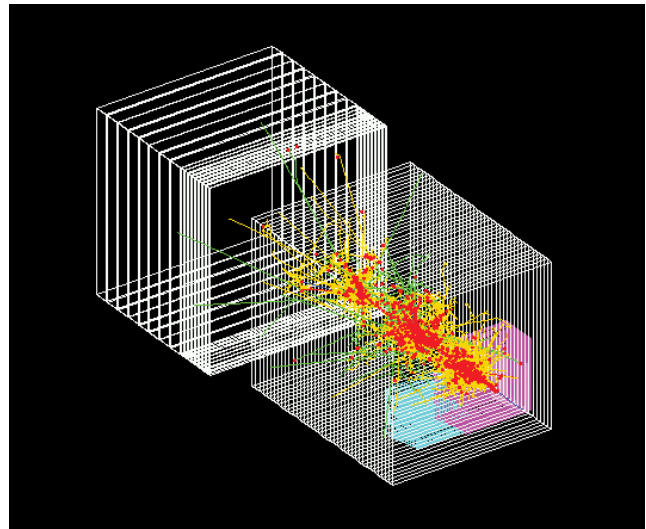


Abbildung 60: Simulation eines Ereignisses im kompletten Prototypen (ECAL, HCAL und tail catcher).

auf eine experimentelle Basis zu stellen. Die Größe des zur Zeit im Bau befindlichen „Kubikmeter“-Prototypen ist dabei durch die Ausdehnung hadronischer Schauer bei ILC typischen Energien vorgegeben, die Granularität und damit die Zahl der elektronischen Kanäle (ca. 8000) durch die bei der Rekonstruktion der Schauer aufzulösenden Substrukturen. Ein simuliertes Ereignis in der geplanten Konfiguration aus elektromagnetischem und hadronischem Kalorimeter sowie „tail catcher“ ist in Abb. 60 gezeigt.

In einer Vorstudie ist ein kleineres Kalorimeter („Minical“) mit ca. 100 SiPMs gebaut und 2003 im Elektronen-Teststrahl am DESY untersucht worden. Im Jahre 2004 wurde die Datenanalyse mit einer Publikation abgeschlossen. Die Messungen wurden außerdem ergänzt durch Vergleiche mit einer mit Avalanche-Photodioden instrumentierten Variante. Die Resultate in Abb. 61 zeigen, dass die erzielten Auflösungen praktisch gleich und anhand von Simulationen gut verstanden sind. SiPMs haben eine Pixel-Struktur und erzeugen ein Signal, das der Zahl der von Photonen getroffenen Pixel entspricht. Damit gehen Sättigungseffekte einher. Ein wichtiges Ergebnis des Minical-Teststrahlprogramms ist, dass diese Effekte zuverlässig korrigiert werden können und ohne nennenswerten Einfluss auf die Auflösung bleiben.

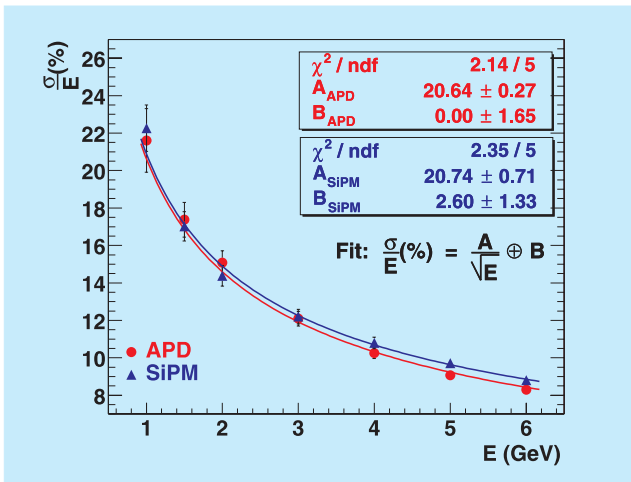


Abbildung 61: Mit zwei Auslesetechniken gemessene Auflösung für Elektronen im Minical (siehe Text).

Für den Kubikmeter-Prototypen war das gesamte elektro-mechanische Konzept zu erarbeiten. Die Absorberstruktur wurde dabei so flexibel ausgelegt, dass neben Szintillator-Modulen auch andere Auslesetechnologien getestet werden können, z. B. ein digitales HCAL auf Gas Basis. Konnte das „Minical“ noch mit Elektronik-Komponenten aus der Zeit der PETRA-Experimente ausgelesen werden, wurde 2004 mit der Entwicklung neuer Frontend-Elektronik begonnen. Das Konzept ist ähnlich dem ebenfalls in der CALICE-

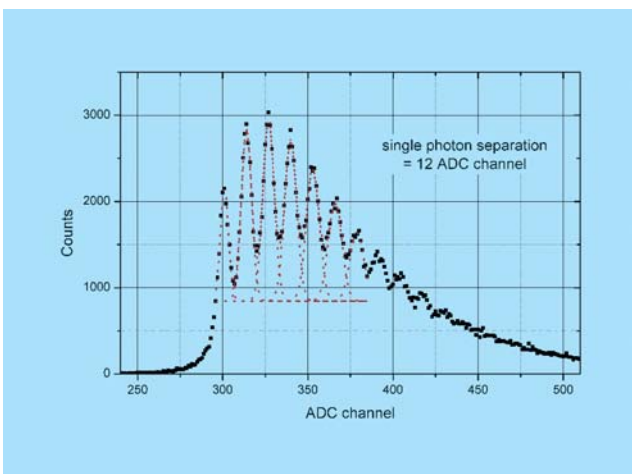


Abbildung 62: Pulshöhenspektrum eines Silicon Photomultipliers. Deutlich erkennbar sind die äquidistanten Signale für einzelne Photoelektronen.

Kollaboration gebauten elektromagnetischen Silizium-Wolfram-Teststrahlkalorimeters (ECAL), so dass sich das HCAL in die ECAL-Datenakquisition integrieren lässt. Die Elektronik-Karten für das HCAL wurden in enger Zusammenarbeit zwischen den DESY-Gruppen FLC und FEB entwickelt. Ihr Herzstück ist ein am LAL in Orsay entwickelter ASIC-Chip mit Vorverstärkern für 18 Kanäle. Am Ende des Berichtsjahres konnte der Bau der ersten Detektorebene mit den ersten 220 mit SiPMs versehenen Szintillatorplättchen beginnen, und die ersten Chips der Serienproduktion erfolgreich getestet werden. Abb. 62 zeigt ein dabei aufgenommenes Pulshöhenspektrum; zu erkennen sind die für die Kalibration der SiPMs wichtigen Signale einzelner Photoelektronen.

Studien zum Vertexdetektor an MAPS Sensoren

Für den Vertexdetektor eines ILC-Detektors werden mehrere Technologien studiert. DESY beteiligt sich im Rahmen der „Monolithic Active Pixel Sensor“ Gruppe an Studien zum Verhalten dieser Sensoren, zur mechanischen Aufhängung und zur Kühlung durch Verdampfungskühlung. IReS in Strasbourg hat einen ersten großen Sensor entwickelt: Mimoso V, 18 mm × 18 mm groß, mit 256 kpixel und einer Pixelgröße von 17 μm. Dieser Sensor ist die Grundlage für die Studien bei DESY. Um das Verhalten dieses Pixeldetektors kennenzulernen, sind drei Sensoren, die IReS DESY zur Verfügung gestellt hat, in ausführlichen Tests mit einer Fe55-Quelle und im Teststrahl vermessen worden. Dafür musste das vorhandene Datenerfassungssystem für das Test-Teleskop modernisiert und den Anforderungen des Pixeldetektors angepasst werden.

Abbildung 63 zeigt ein typisches Ereignis, das im Teststrahl aufgenommen wurde. Man unterscheidet klar 2 typische Cluster, die aus mehreren Pixeln bestehen und 2 „heiße“ Pixel. Die Analyse der Daten ist noch nicht abgeschlossen. Insbesondere werden die Ortsauflösung und die Nachweiswahrscheinlichkeit noch untersucht. Der Ortsauflösung sind, bedingt durch den niedrigen Impuls der Elektronen von 6 GeV/c, Grenzen durch die Vielfachstreuung gesetzt.

Um das bestmögliche Verhalten des Vertexdetektors zu erreichen, muss die Materie, die die Teilchen durchdrin-

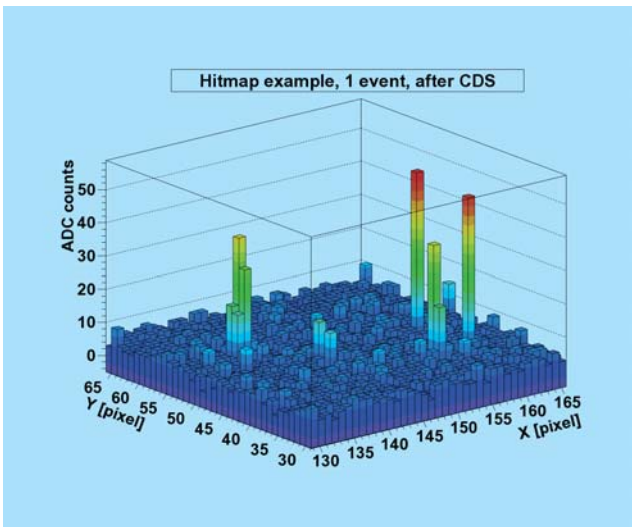


Abbildung 63: Beispiel eines guten Ereignisses im MAPS-Prototypen mit 2 Clustern und 2 „heißen“ Pixeln.

gen, so dünn wie nur möglich sein, um Vielfachstreuung zu reduzieren. Neben der Reduzierung der Sensordicke muss die mechanische Halterung wie alle anderen Materialien auf das Minimum reduziert werden. Auf der Suche nach geeignetem Material für die Tragestrukturen (Leiter) zeigte sich neben CVD-Diamant auch „geschäumtes“ Siliziumkarbid (SiC) als sehr gut geeignet. Erste Leitern aus SiC sind gefertigt worden.

Weitere Studien befassten sich mit dem Aufbau eines Kühlsystems, das entlang einer Leiter eine gleichmäßige Wärmeabfuhr garantieren soll. Dabei wird das Verfahren der Verdampfungskühlung in sehr dünnen Röhrchen benutzt. Abbildung 64 zeigt den Messaufbau, in dem die verschiedenen Aspekte des mechanischen Aufbaus und des Kühlsystems getestet werden sollen.

Zeit-Projektions-Kammer

Als eine wichtige Komponente des Spurerkennungssystems für einen Detektor am ILC ist eine Zeit-Projektions-Kammer (TPC) in Diskussion. Der Schwerpunkt der F&E-Aktivitäten am DESY liegt bei der Untersuchung eines neuartigen Gasverstärkungssystems basierend auf Gas-Elektronen-Vervielfacher (GEM). Ziel ist eine Ortsgenauigkeit von besser als $100 \mu\text{m}$ über dem gesamten Kammervolumen.

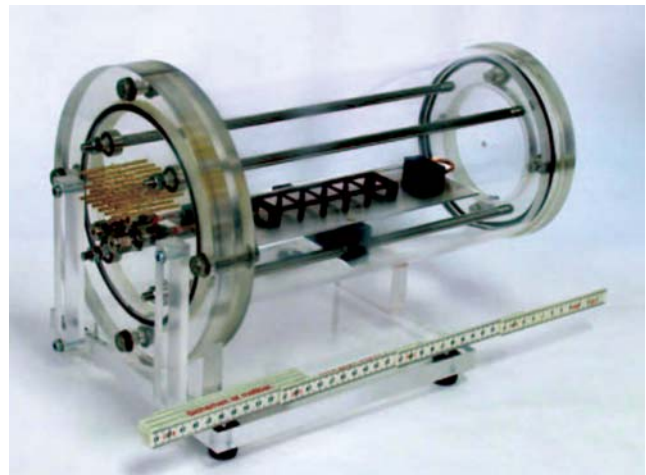


Abbildung 64: Messaufbau zum Testen des mechanischen Aufbaus und des Kühlsystems.

In den vergangenen Jahren sind bereits eine Reihe vielversprechender, grundlegender Versuche zum Einsatz von GEMs in einer TPC in enger Zusammenarbeit mit anderen Instituten in Deutschland, Frankreich und Kanada durchgeführt worden. Im Jahr 2003 ist ein spezieller TPC-Prototyp bei DESY entwickelt und gebaut worden. Dieser ist so konstruiert, dass er in der Hoch-Magnetfeld-Testanlage, die seit 2002 bei DESY zur Verfügung steht, betrieben werden kann.

Im Jahr 2004 wurden insgesamt rund eine halbe Million Spuren von kosmischen Myonen mit dem neugebauten TPC-Prototypen in der Hochfeld-Testanlage aufgezeichnet. Die gewonnenen Daten dienen vornehmlich der Untersuchung des räumlichen Auflösungsvermögens einer TPC. Abbildung 65 zeigt ein vorläufiges Ergebnis der Studien. Um den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Ortsauflösung studieren zu können, wurden Daten mit unterschiedlichen Auslesegeometrien und Gasen als Funktion der Kammerpositionen aufgezeichnet. Desweiteren stehen noch rund 300 000 Ereignisse, die im Jahr 2004 in einem Elektronenteststrahl am DESY aufgezeichnet wurden, für Auflösungsstudien zur Verfügung. Im Zuge der noch nicht abgeschlossenen Datenanalyse wurde die verwendete Rekonstruktions- und Simulationssoftware weiterentwickelt und verbessert. Ziel der Untersuchung ist es, zu verstehen, welche Faktoren die Auflösung limitieren, um die Leistungsfähigkeit der Kammer dann in einem weiteren Schritt optimieren zu können.

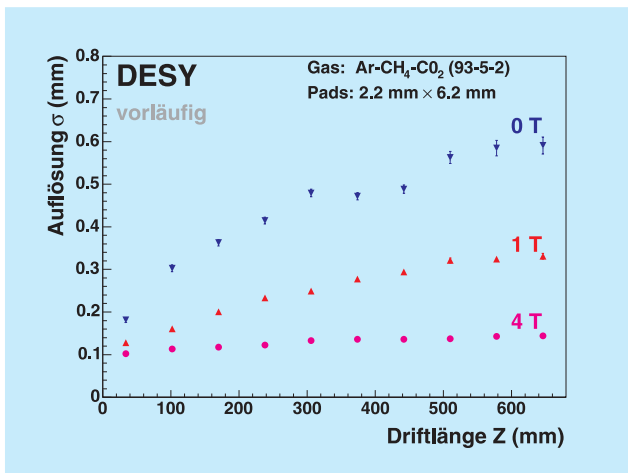


Abbildung 65: Räumliches Auflösungsvermögen einer TPC in transversaler Richtung als Funktion der Driftlänge bei unterschiedlichen Magnetfeldstärken.

Neben der Untersuchung der Ortsauflösung einer TPC mit GEM-Verstärkungssystem sind auch Untersuchungen zur Bestimmung der Doppelspurtrennung der Kammer begonnen worden. Hierzu kam ein UV-Laser zum Einsatz, dessen Licht in zwei Strahlen aufgespalten wurde. In den letzten Monaten begann die Entwicklung eines Strahlführungssystems, das die Strahlteilung und -fokussierung leistet. Ferner sind für die Messungen notwendige Modifikationen an dem TPC-Prototypen durchgeführt worden, die es ermöglichen, das Laserlicht in das Driftvolumen der Kammer einzuspeisen.

Der Hoch-Magnetfeld-Teststand hat sich in dieser ersten Messreihe bewährt. Eine weitere Nutzung dieser „Infrastruktur“ ist für fortgesetzte Studien zur Ortsauflösung auch für andere Spurdetektoren vorgesehen.

Polarisierte Positronenquelle (E166)

In den vergangenen Jahren wurde im Rahmen der Studien für einen Linearbeschleuniger gezeigt, dass die Polarisierung beider Strahlen – Positronen sowie Elektronen – das Physikpotential erheblich erweitert. Während die Methode zur Erzeugung polarisierter Elektronen durch Photoemission an geeigneten GaAs-Strukturen inzwischen weit fortgeschritten ist und hohe Polarisationsgrade erreicht werden, ist die Erzeugung polarisierter Positronen vergleichsweise Neuland. Mit dem

E166 Experiment am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) soll erstmals die Produktion polarisierter Positronen mit einem wendelförmigen Undulator experimentell demonstriert werden. Diese Idee geht auf eine Arbeit von Balakin und Mikhailichenko aus dem Jahre 1979 zurück: ein hochenergetischer Elektronenstrahl wird durch einen wendelförmigen Undulator geschickt. Dabei entsteht zirkular polarisierte Gammastrahlung, die hinter dem Undulator auf ein dünnes Target trifft und Elektron-Positron Paare erzeugt. Fängt man mit der nachfolgenden Strahl-optik lediglich die hochenergetischen Positronen ein, erwartet man Polarisationsgrade bis zu 60%.

Das E166 Experiment wird am SLAC FFTB unter internationaler Beteiligung durchgeführt. DESY hat die Verantwortung für Design, Bau, Betrieb und Auswertung des Polarimeters übernommen, mit dem die erreichte Polarisierung der Positronen vermessen werden wird. Es handelt sich hierbei um ein Comptontransmissionspolarimeter, das aus einem Analysiermagneten (Verantwortung DESY Hamburg) und einem CsI(Tl) Kalorimeter (Verantwortung DESY Zeuthen) besteht. Ein weiterer Analysiermagnet wird im Polarimeter zur Messung der Photonpolarisation eingesetzt.

Die beiden Analysiermagnete (Abb. 66) wurden von DESY Hamburg konzipiert und vom Efremov-Institut St. Petersburg hergestellt. Ein in den Magneten eingebetteter Ferromagnet wird durch ein solenoidales Feld auf über 2 T magnetisiert, dabei werden die Elektronen in den unvollständig besetzten inneren 3d-Atom-schalen des Eisens polarisiert. In der Compton Polarimetrie werden nun polarisierte Photonen an den polarisierten Elektronen im Eisen gestreut. Aufgrund der Spinabhängigkeit des Compton-Prozesses ergibt sich bei Umkehrung der Magnetisierung eine Asymmetrie des Transmissions-signals. Die Analysiermagnete sind im Photonarm und im Positronarm, hier zusammen mit dem CsI Kalorimeter, installiert. Im Positronarm werden die erzeugten polarisierten Positronen am Eingang des Analysiermagneten in Photonen rückkonvertiert. Die Polarisierung der Positronen ergibt sich dann aus der gemessenen Asymmetrie der Signale im CsI(Tl)-Kalorimeter.

Zwei Kalorimeter-Prototypen, jeweils bestehend aus einem CsI(Tl) Kristall, aber mit unterschiedlicher Lichtauslese (Photomultiplier bzw. zwei großflächigen Photodioden), wurden Anfang des Jahres noch einmal ausgiebig getestet und dann am SLAC am zukünfti-

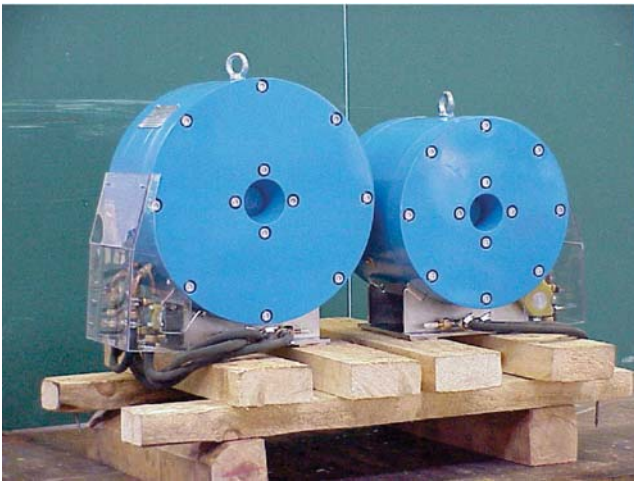


Abbildung 66: Die Analysiermagnete für das E166 Experiment am SLAC. Links ist der Magnet für den Positronarm und rechts ist der Magnet für den Elektronarm zu sehen. Weiterhin sind die Anschlüsse für die Wasserkühlung und die Stromversorgung zu erkennen.

gen Experimentierplatz eingebaut. Beide Prototypen funktionierten einwandfrei; da die Lichtauslese mittels Photodioden einfacher zu kalibrieren war, wurde entschieden, das Kalorimeter mit Photodioden auszustatten. Parasitär zum Betrieb anderer Experimente konnten die Prototypen unter tatsächlichen Strahlbedingungen getestet werden.

Im Laufe des Jahres wurde das Design des Polarimeters vervollständigt. Das Kalorimeter (Abb. 67) besteht aus 9 CsI(Tl) Kristallen mit einer Größe von je $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 28\text{ cm}$ angeordnet in einer 3×3 Matrix.

Die Kristalle wurden von der Firma AMCRYS-H LIMITED aus der Ukraine geliefert und in Zeuthen eingehend auf ihre Szintillationseigenschaften hin untersucht. Alle zeigten hinreichende Qualität. Die mechanische Struktur des Kalorimeters wurde von der Humboldt-Universität, die Verstärker für den Signaltransport wurden gemeinsam mit der Humboldt-Universität entwickelt und gebaut. Das Kalorimeter wurde im Teststrahl am DESY II in Hamburg getestet, bevor es im Sommer zum SLAC gebracht und dort im Experiment installiert wurde. Simulationen mit Hilfe von GEANT3 haben gezeigt, dass man das Kalorimeter durch geeignete Blei- und Wolframwände nahezu vollständig gegen Photonenuntergrund schützen kann. Im

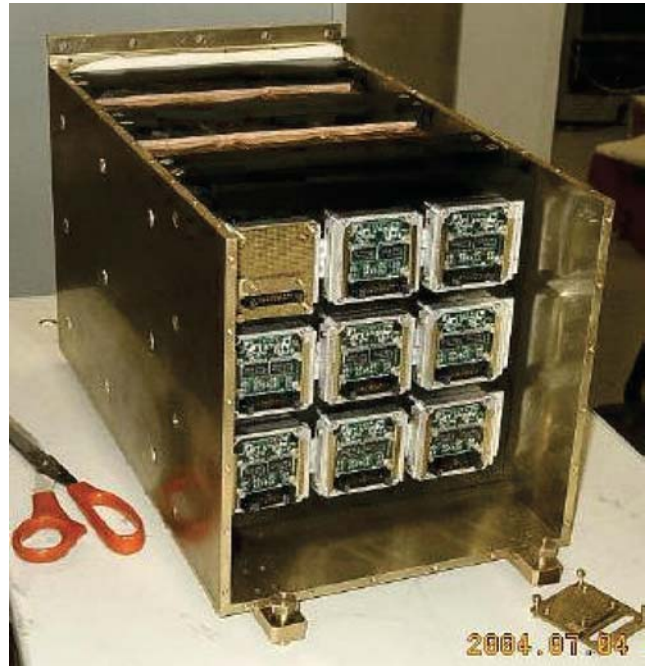


Abbildung 67: Die Anordnung der CsI(Tl) Kristalle im Kalorimeter für das E166 Experiment am SLAC. Die Lichtauslese erfolgt mittels Photodioden; hier ist die Ausleseelektronik zu sehen.

Oktober begann die erste Datennahme für das E166 Experiment, doch aufgrund eines schweren elektrischen Unfalles, der nicht im Zusammenhang mit dem Experiment stand, wurde der Beschleunigerbetrieb nach zweieinhalb Tagen für unbestimmte Zeit unterbrochen. In Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Wiederaufnahme des Strahlbetriebs sind für das Jahr 2005 zwei je ca. 4-wöchige Strahlzeiten geplant.

Die zweieinhalb Tage Strahlzeit bei 28 GeV dienten der ersten Strahljustierung und Untergrunderfassung. Der Undulator war zu diesem Zeitpunkt noch nicht installiert. Das wohl wichtigste und erfreulichste Ergebnis dieser kurzen Strahlzeit war, dass das CsI-Kalorimeter unter realistischen Strahlbedingungen keinen nennenswerten Untergrund registrierte, der direkt vom hochenergetischen Elektronstrahl oder indirekt über Neutronen vom „Strahldump“ ausgeht.

Das Kalorimeter funktionierte unter realistischen Bedingungen ausgezeichnet. Die gewonnenen Daten wurden in Bezug auf Kalibration und Linearität untersucht und bisher konnte eine Genauigkeit der Energiemes-

sung von etwa 20% erreicht werden. Ziel ist es, diese auf etwa 5% zu verbessern. Parallel zur Auswertung der Daten soll die vollständige Simulation des Experimentes mittels GEANT4 vorbereitet werden. Dabei ist zu erwähnen, dass hier auch Entwicklungsarbeit an GEANT4 geleistet werden musste, um die Polarisationsabhängigkeit wichtiger Prozesse in das Programm zu integrieren.

Die Analysiermagnete wurden vor der Installation am SLAC im August 2004 am DESY in Hamburg getestet. Beide Magnete konnten bis zu ihrem gewünschten Maximalwert von ± 60 A hochgefahren werden. Entscheidend für die Bestimmung der Magnetisierung des Eisens ist die Messung des magnetischen Flusses, die mit Hilfe von Induktionsspulen erfolgt, die um den Ferromagneten gewickelt sind. Eine am DESY durchgeführte Messung ergab einen Wert von 0.680 Vs, was sehr gut mit dem erwarteten Wert übereinstimmt.

Beide Magnete wurden Mitte September am SLAC im FFTB-Tunnel installiert. Leider ist ein Betrieb der Magnete nach dem erwähnten Unfall am SLAC bisher nicht möglich gewesen.

Arbeiten zum Energiespektrometer

Gemeinsam mit dem VIK Dubna, Dzhelapov Laboratorium für Kernprobleme und der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Theoretische Elektrodynamik, wurde eine Initiative gestartet, ein für den Linear Collider notwendiges Spektrometer zur Messung der Strahlenergie mit einer relativen Genauigkeit von besser als 10^{-4} zu entwickeln. Ausgehend von den Forderungen des Physikprogramms beim ILC wurden Design und Parameter der Magnete und der hochauflösenden Strahllagemonitore festgelegt. An der Technischen Universität Berlin wurden Monitore entwickelt, die einige zehn Nanometer Positionsgenauigkeit für den Einzelpaketbetrieb besitzen. Die 5.5 GHz Variante dieser Monitore erlaubt den Ort des Teilchenpakets (mit einer provisorischen Elektronik) mit 200 nm Präzision über eine Distanz von ± 1.5 mm zu bestimmen. Die theoretischen Erwartungen an diesen Monitor Typ (Cavity Monitor mit speziellen Wellenleitern, siehe auch Abb. 68) wurden durch Messungen an der Beschleunigeranlage ELBE in Rossendorf bei Dresden weitestgehend bestätigt.

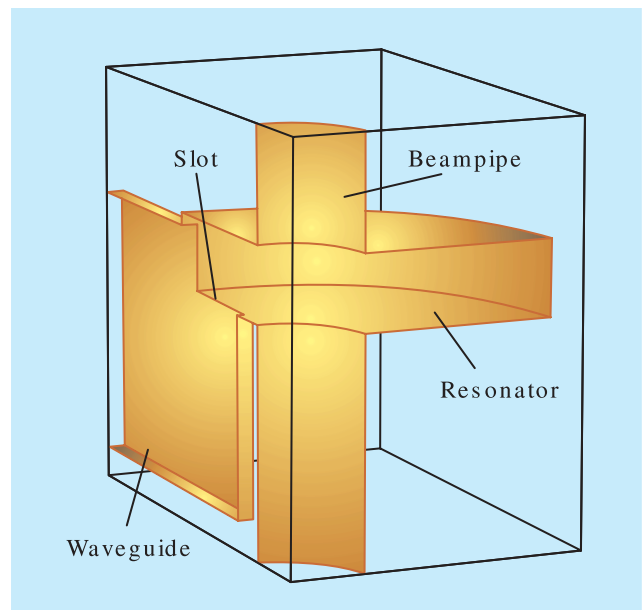


Abbildung 68: RF Monitor mit Koppelschlitz und Wellenleiter.

Darüber hinaus wurden Fragen zur Präzisionsausrichtung und Stabilisierung der Komponenten des Energiespektrometers sowie ihrer Überwachung untersucht und Vorschläge hierzu erarbeitet. Die erzielten Resultate sind in einem Technischen Design Report (LCNote) zusammengefasst.

Komplementäre Möglichkeiten zur Bestimmung der Strahlenergie („radiative return“ Ereignisse, Nutzung der Synchrotronstrahlung) wurden ebenfalls initiiert. In Zeuthen wurden „radiative return“ Ereignisse vom Typ $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ als erstes wegen ihrer Einfachheit bei 350 GeV analysiert. Mit einer integrierten Luminosität von 100 fb^{-1} konnte ihre Nutzbarkeit zur Messung der Strahlenergie nachgewiesen werden. Der nur von der Statistik herrührende Fehler von über 10^{-4} für die Strahlenergie erfordert aber, weitere Prozesse in die Untersuchungen einzubeziehen.

Weiterentwicklung der ILC Simulations-Software

Die DESY LC Gruppen tragen in enger Zusammenarbeit mit DESY IT wesentlich zur Entwicklung eines

Software Systems für Studien für den ILC bei. In den letzten Jahren wurde in enger Kooperation mit dem SLAC ein Datenformat entwickelt, in dem Daten für den ILC Detektor abgespeichert und verarbeitet werden können (LCIO). Im Jahre 2004 wurde dieses Format weiterentwickelt, und fand immer weitere Akzeptanz bei Gruppen, die am ILC arbeiten. Ein Fortran Interface für LCIO einschließlich Dokumentation wurde im Berichtszeitraum erstellt.

Nach der LCWS'04 wurde mit der Entwicklung eines Programms begonnen, das die einfache Analyse von LCIO basierenden Daten erlaubt. Dieses Program, MARLIN (modular analysis and reconstruction system for the international linear collider) konnte im Herbst in einer ersten Version bereitgestellt werden. Seitdem werden von mehreren Gruppen Module entwickelt, die in der Simulation, Digitalisierung und in der Rekonstruktion Anwendung finden werden.

Als erster Test dieses Software Systems dienen die Detektor Entwicklungsarbeiten. Die Daten sowohl für den Kalorimeter Test wie auch für den TPC Test werden als LCIO Daten abgespeichert. Die Entwicklung der Analyse-Software im MARLIN System hat bereits begonnen.

Neben den neuen, C++ basierenden Paketen werden die existierenden, Fortran basierenden Programme weiterhin unterstützt. Das Detektorsimulationspaket BRAHMS wurde so modifiziert, dass variable Zell-Größen im Kalorimeter berücksichtigt werden können und das Einlesen (bzw. die Ausgabe) der Simulationsergebnisse von (in) einem LCIO file ermöglicht wird.

Das schnelle Detektorsimulationsprogramm SIMDET wurde weiter gepflegt und neue Entwicklungen wurden eingearbeitet. Die erwähnten Software-Pakete werden in einem eigens eingerichteten CVS-Server den Nutzern weltweit zur Verfügung gestellt.

Das Zentrale Datennahme System

Ein wichtiger Aspekt der Detektorentwicklung ist das Zentrale Datennahmesystem, mit dessen Hilfe die Vielzahl der Signale der verschiedenen Detektorkomponenten erfasst, für die spätere Analyse aufbereitet und gespeichert werden. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei

auf einer verlustfreien Datenerfassung, um das physikalische Potential des ILC voll auszuschöpfen und gleichzeitig den Aufwand im Rahmen zu halten.

Beim ILC treten Kollisionen nur 5 mal pro Sekunde in einem Zeitfenster von etwa einer Millisekunde auf. In dieser einen Millisekunde treffen etwa 3000 Teilchenpakete im zeitlichen Abstand von wenigen hundert Nanosekunden aufeinander.

Diese Zeitstruktur des ILC erlaubt es, die anfallende Datenmenge während der Periode, in der die Kollisionen stattfinden, lokal in den Detektorkomponenten zu erfassen, zu speichern und in der verbleibenden Zeit von etwa 0.2 Sekunden vor der nächsten Kollision die Daten vom Detektor über ein Datennetzwerk in eine Rechnerfarm zu übertragen. In dieser werden die Daten weiterverarbeitet, die interessanten Ereignisse selektiert und letztlich die relevante Information zum Speichern für die Analyse aufbereitet. Dieses Konzept erlaubt es, auf einen konventionellen Hardware Trigger zu verzichten.

Dieses Konzept des „Software Triggers“ wurde in der ECFA/DESY Studie entwickelt und ist im TDR bereits prinzipiell beschrieben. In der anschließenden ECFA Studie sowie den Studien in Amerika und Asien wird dieses Konzept im Rahmen der interregionalen Zusammenarbeit weiterentwickelt und die Auswirkungen auf die verschiedenen Detektorkomponenten untersucht und mögliche Probleme sowie deren Lösungen erörtert.

Im Bereich der zentralen Datenerfassung sind konzeptionelle Studien über die notwendige Netzwerkbandbreite, die Rechenleistung und die Speicherkapazität notwendig. Dazu werden Abschätzungen der Ereignisgrößen in Abhängigkeit der eingesetzten Detektorkomponenten erarbeitet. Fragen der Kalibration sowie der Überwachung und Steuerung der Detektoren insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen für das Global Detector Network sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

Ausbildung

Ein wesentlicher Teil der Arbeiten zum ILC, besonders im Bereich der Physik und der Detektorentwicklungen, wird von Doktoranden und Diplomanden durchgeführt.

Das Interesse an Arbeiten im Bereich des ILC hat auch in diesem Jahr angehalten. Die Verbindung von der Entwicklung anspruchsvoller Nachweisgeräte, interessanter Physik und einer sehr internationalen Atmosphäre des Projektes hat eine hohe Attraktivität. Daneben haben etwa 10 Schüler die Möglichkeit wahrgenommen, im Laufe des Jahres zwei- bis dreiwöchige Praktiken in der ILC Arbeitsgruppe zu absolvieren. Die Schüler nehmen am „Leben“ der Forschungsgruppe teil, und verfolgen daneben ein eigenständiges, kleines Projekt, das ihnen die Möglichkeit gibt, einen Einblick in wissenschaftliches Arbeiten zu bekommen. In der Abbildung 69 ist der experimentelle Aufbau zu sehen, an dem die Schüler arbeiten.

Zusammenfassung und Ausblick

Beide Standorte DESYs, Hamburg und Zeuthen, engagieren sich in den Arbeiten am ILC. Studien zur Physik am ILC werden an beiden Orten intensiv durchgeführt. Die Maschinenphysik hat naturgemäß ihr Schwergewicht in Hamburg, wo die großen Anlagen installiert sind. Zeuthen engagiert sich hier vor allem im Bereich der Quelle (PITZ) und der Erzeugung polarisierter Positronen. In Hamburg profitieren die Arbeiten am ILC vor allem von der Synergie mit der Entwicklung des XFEL, insbesondere in der Weiterentwicklung der supraleitenden Technologie. Darüber hinaus werden originäre Arbeiten zum Thema der Dämpfungsringe, der Strahldynamik und des Global Accelerator Networks weitergeführt. Arbeiten zum Detektor konzentrieren sich in Hamburg auf TPC Entwicklungen und die Entwicklung, den Bau und die Inbetriebnahme des HCAL Prototypen. In Zeuthen wird an der Instrumentierung der Vorwärtsrichtung gearbeitet. Alle anderen Arbeiten, speziell auch die Entwicklungen der Software, finden in enger Zusammenarbeit und Abstimmung beider Labore statt.

Im nächsten Jahr wird einer der Schwerpunkte der Arbeiten die Inbetriebnahme des großen HCAL Proto-

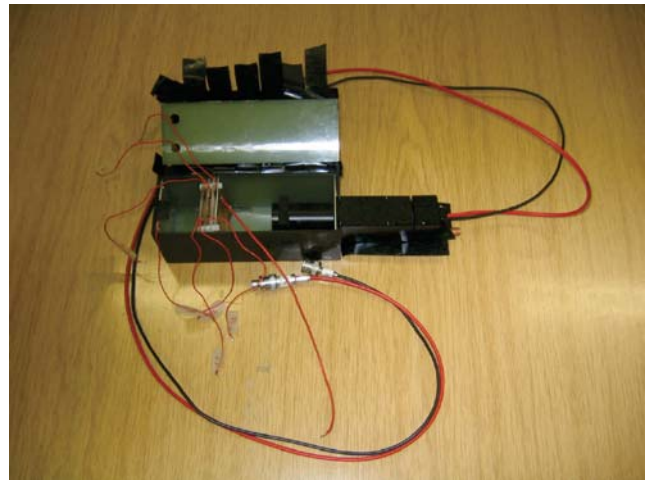


Abbildung 69: *Experimenteller Aufbau, der von Schülerinnen und Schülern im Rahmen mehrerer mehrwöchiger Praktika erstellt worden ist.*

typen sein. Zusammen mit Gruppen aus Frankreich, Großbritannien, der tschechischen Republik und Russland wird dieser im DESY Teststrahl zusammen mit einem ECAL Modul ausgetestet werden, bevor er dann im Jahre 2006 vermutlich ans Fermilab an einen hadronischen Teststrahl geht. Die Arbeiten im Bereich der anderen Detektorprojekte werden auf annähernd konstantem Niveau weitergeführt.

Nach der internationalen Entscheidung der Teilchenphysiker, den Beschleuniger in der kalten Technologie zu bauen, werden in den kommenden Jahren verstärkt Aktivitäten der FH Gruppen im Bereich der Maschine sichtbar werden. So haben bereits Arbeiten angefangen, um die Zuverlässigkeit des Beschleunigers zu simulieren. Arbeiten im Bereich der Maschineninstrumentation sind in mehreren Bereichen geplant. Insgesamt werden sich die Aktivitäten zum ILC weiter ausdehnen, und auch verstärkt Beiträge aus anderen DESY Bereichen integrieren. Dem hat auch die Gründung des ILC Projektes (<http://ilc.desy.de>) am DESY Rechnung getragen.

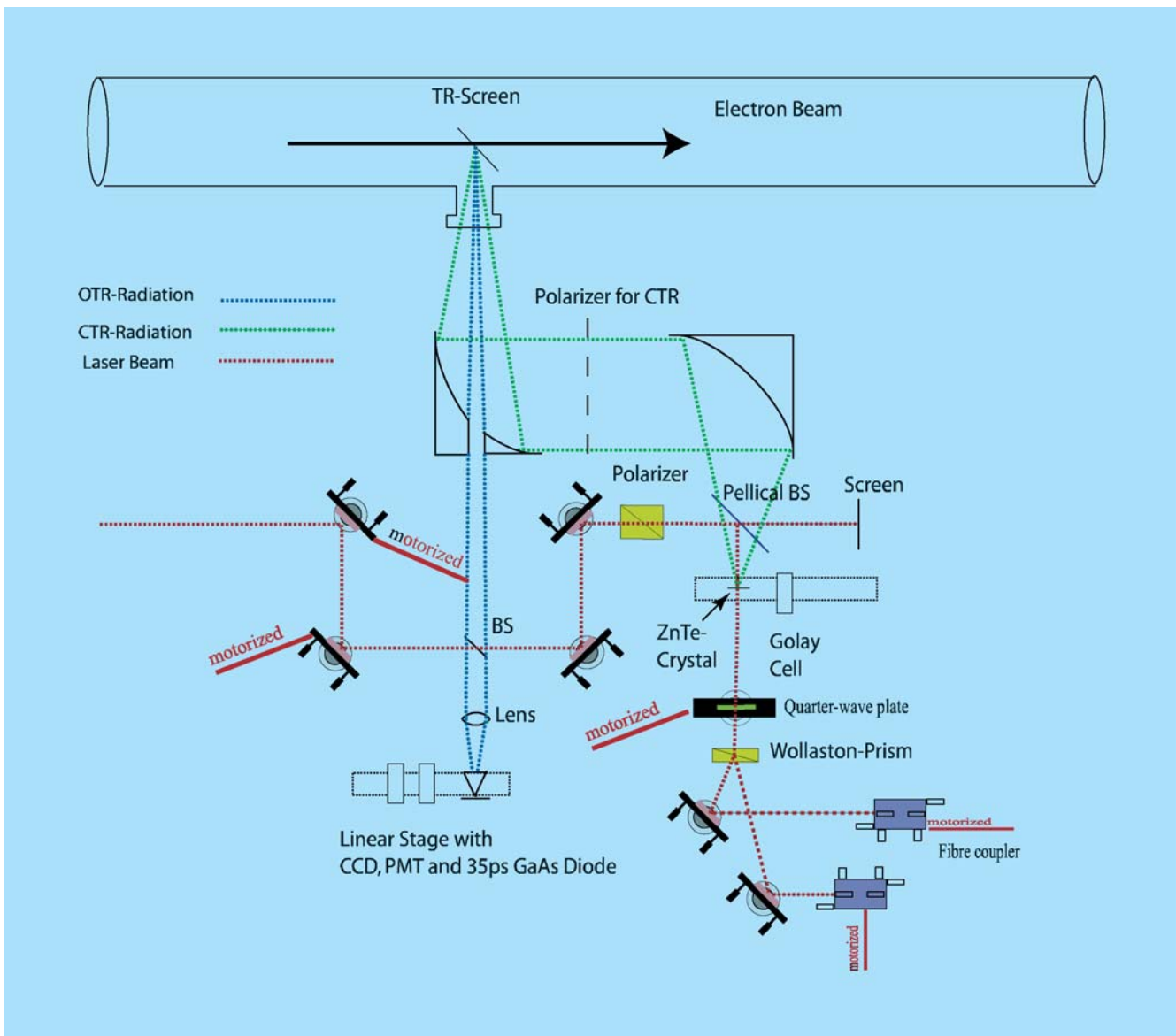


Abbildung 70: Aufbau des EOS-Experiments am 100 MeV-Linac der Swiss Light Source.

Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe „Forschung Linearbeschleuniger-Technologien“ (FLA) ist Anfang 2004 aus dem Zusammenschluss der Gruppe FDET und eines Teils der Gruppe HERA B hervorgegangen. Die in den Vorjahren von FDET durchgeführten Untersuchungen zu supraleitenden Resonatoren mit höchsten Gradienten und die Messungen zur Oberflächensupraleitung sind im Wesentlichen Ende 2003 abgeschlossen worden. Im Jahr 2004 hat sich die Gruppe FLA darauf konzentriert, an höchstauflösenden Systemen zu arbeiten, die für die Strahldiagnose an supraleitenden Linearbeschleunigern benötigt werden mit der Zielrichtung Linear Collider und VUV/Röntgen-FEL. Eine Besonderheit dieser neuen Beschleuniger sind die extrem kurzen Elektronenbunche, die insbesondere beim FEL nötig sind, um hohe Laser-Verstärkung in den Undulatormagneten zu erreichen.

Die experimentelle Analyse dieser Bunche wird einmal durch direkte Zeitmessungen mit Hilfe der elektro-optischen Abtastung durchgeführt. Zum Anderen ist ein optisches Strahltransportsystem für Übergangsstrahlung im Bereich von 0.2 bis etwa 30 THz entwickelt worden, um durch Messungen im Frequenzbereich feinste Strukturen in den Ladungspaketen identifizieren zu können. Die Anwendung komplementärer Messmethoden hat sich schon bei unseren bisherigen Arbeiten zur Strahldiagnose als sehr wertvoll erwiesen.

Aus den Arbeiten zur höchstauflösenden Bunchlängendiagnostik hat sich als neues Arbeitsfeld die Entwicklung optischer Methoden zur Synchronisation der Beschleunigerkomponenten (Injektor, HF-Resonatoren usw.) und der Experimente mit Femtosekundengenauigkeit ergeben. In diesem Aufgabenfeld wurden eine Doktorarbeit begonnen und bereits erste Erfolge erzielt.

Die Gruppe FLA hat im Jahr 2004 mit Wissenschaftlern der Universität Hamburg, der RWTH Aachen und des Paul-Scherrer-Instituts zusammengearbeitet. Es sind

zwei Diplomarbeiten abgeschlossen worden. Eine Dissertation ist nahezu fertiggestellt, an drei weiteren wird gearbeitet.

Arbeiten zur elektro-optischen Abtastung der Elektronen-Bunche in Linearbeschleunigern

Experimente an der Swiss Light Source

Die in den Vorjahren begonnenen Messungen der longitudinalen Ladungsverteilung in den Elektronenpaketen wurden erfolgreich fortgesetzt. Die Methode der elektro-optischen Abtastung (electro-optic sampling EOS) wurde angewandt, um die Bunch-Länge am 100 MeV-Linac der Swiss Light Source zu bestimmen. Das Experiment, das in Kooperation mit dem Paul-Scherrer-Institut durchgeführt wurde, ist in Abb. 70 dargestellt. Die von den Elektronenpaketen erzeugte kohärente Übergangsstrahlung (coherent transition radiation CTR) wird aus dem Linac-Strahlrohr ausgekoppelt und mit zwei Paraboloid-Spiegeln auf den ZnTe-Kristall fokussiert. Der optische Anteil der Strahlung wird durch ein Loch im ersten Paraboloid-Spiegel geleitet und auf einen Photomultiplier abgebildet. Ein Teilstrahl des Titan-Saphir-Lasers wird ebenfalls auf den Multiplier geführt, der einen Zeitabgleich der beiden Signale mit einer Genauigkeit von 500 ps erlaubt. Der andere Teilstrahl des Femtosekundenlasers durchläuft einen Polarisator und wird auf den ZnTe-Kristall fokussiert. Hinter dem Kristall befindet sich eine $\lambda/4$ -Platte und ein Wollaston-Prisma, welches die beiden orthogonalen Polarisationszustände des Laserstrahls trennt, die dann in zwei optische Fasern eingekoppelt und zum Diodendetektor außerhalb des Linac-Tunnels geleitet werden. Eine anspruchsvolle Aufgabe bestand

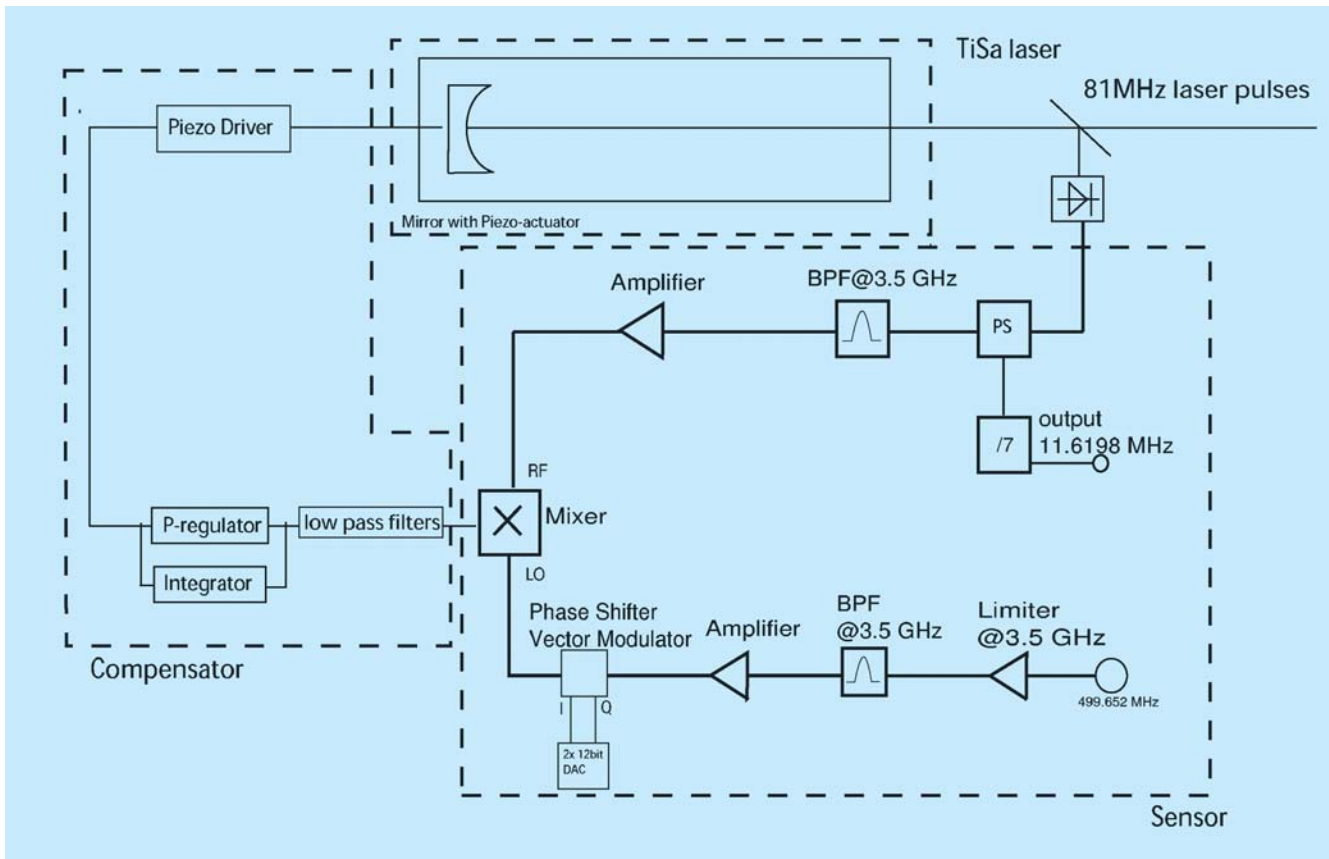


Abbildung 71: Elektronik zur Synchronisation des Titan-Saphir-Lasers mit der HF des SLS-Linacs.

darin, den Femtosekundenlaser mit einer Repetitionsrate von 81 MHz mit der 500 MHz-Hochfrequenz des PSI-Linacs zu synchronisieren. Dies wurde über eine Vergleichsfrequenz von 3.5 GHz bewerkstelligt, die die 7. Harmonische der Linac-HF und die 43. Harmonische der Laserfrequenz ist. Die dazu benötigte Elektronik (siehe Abb. 71) wurde in unserer Gruppe entwickelt und in Zusammenarbeit mit der Gruppe MHF gebaut.

Sind die beiden 3.5 GHz-Signale nicht exakt frequenzgleich, liefert ein Mischer ein Signal, mit dessen Hilfe die Resonatorlänge des Lasers über einen Piezospiegel nachgeregelt wird. Aus dem Rauschspektrum am Ausgang des Mixers kann man die Zeitschwankungen (time jitter) in der Laser-Synchronisation relativ zur Linac-HF bestimmen. Diese liegen unter 40 fs (Femtosekunden) und sind damit sehr viel geringer als die zeitlichen Schwankungen der Elektronen-Bunche relativ zur HF des Linacs.

Abbildung 72 zeigt die Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers und des Diodendetektors auf einem 2 GHz-Oszilloskop.

Die Experimente zur Abtastung der Elektronenbunche am PSI-Linac sind im Sommer 2004 erfolgreich abgeschlossen worden. Eine gemessene Zeitverteilung wird in Abb. 73 gezeigt. Die Unterschwinger im Signal werden durch Beugungseffekte beim Auskoppeln und Fokussieren der Übergangsstrahlung verursacht. Die gemessene Bunchlänge von 2 ps (Halbwertsbreite) ist in Übereinstimmung mit den theoretischen Erwartungen.

Elektro-optischer Aufbau am Linac des VUV-FEL

Am Linac des VUV-FEL ist vor dem Eintritt des Elektronen-Strahls in den Undulatorbereich ein EOS-

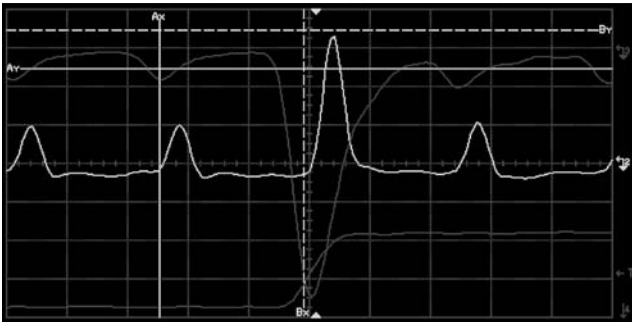


Abbildung 72: Oszillographenbild der Signale des zeitdefinierenden Photomultipliers (obere Spur, negative Pulse) und des Diodendetektors (mittlere Spur, positive Pulse). Die Zeitskala beträgt 5 ns/Einteilung. Die Pulse des Titan-Saphir-Lasers (TiSa) haben einen Abstand von 12.3 ns. In der Mitte des Bildes bei $t \approx 0$ sieht man die Überlappung des TiSa-Signals mit dem Puls der optischen Übergangsstrahlung. Der Multiplier dient dazu, die zeitliche Koinzidenz mit einer Genauigkeit von 500 ps herzustellen. Der 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.

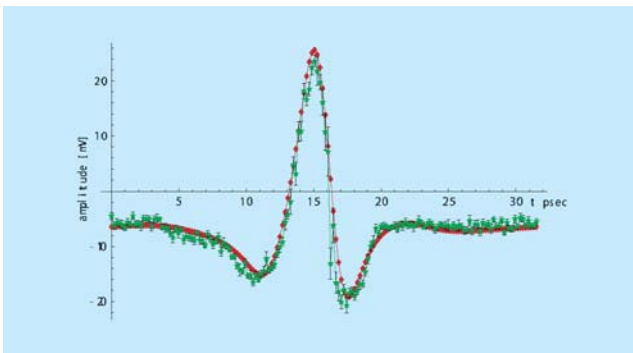


Abbildung 73: Das gemessene Zeitprofil der SLS-Linac-Bunche (Punkte mit Fehlerbalken) im Vergleich mit einer Anpassungsrechnung, die die Beugung der Übergangsstrahlung berücksichtigt.

Experiment aufgebaut worden, bei dem das mitgeführte Ladungsfeld der Elektronenpakete direkt gemessen werden kann. Auf die Weise entfallen die Beugungsverluste, die bei Messungen mit kohärenter Übergangsstrahlung das Frequenzspektrum nach unten beschnei-

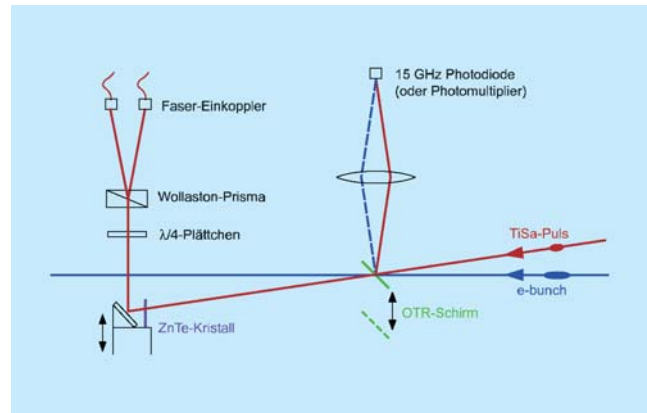


Abbildung 74: EOS-Aufbau am Linac des VUV-FEL.

den und damit Verzerrungen des Ladungsprofils vortäuschen. Es wurde eine spezielle Vakuumkammer entworfen und gebaut, in die der Laserstrahl durch ein dünnes Fenster unter einem Winkel von 6° gegen den Elektronenstrahl eintritt. Mittels eines fahrbaren Schirms können der Laserstrahl und die optische Übergangsstrahlung (optical transition radiation OTR) auf eine schnelle Photodiode (oder wahlweise einen Photomultiplier) geleitet werden, mit deren Hilfe die zeitliche Synchronisation der Laserpulse mit den Elektronenbunchen mit ca. 100 ps Genauigkeit eingestellt werden kann. Vor Beginn der elektro-optischen Abtastung wird der OTR-Schirm herausgefahren. Der schematische Aufbau ist in Abb. 74 dargestellt.

Das Experiment ist weitgehend fernsteuerbar aufgebaut, da der Zugang zum Beschleuniger nur beschränkt möglich ist. Die Synchronisation des TiSa-Lasers (81 MHz) mit der Linac-HF (1300 MHz) erfolgt mit einer neu gebauten Elektronik (Abb. 71), in der die 16. Harmonische der Laserfrequenz mit der Linac-HF gemischt wird. Der EOS-Aufbau ist ausgetestet und betriebsbereit, die Messungen können beginnen, sobald Strahlzeit am Linac zur Verfügung steht.

Numerische Studien zur Pulsverbreiterung in elektro-optischen Kristallen

Die Anregung transversal-optischer (TO) Gitterschwingungen setzt eine untere Grenze für die kürzeste auflösbare Pulsdauer. Für Zink-Tellurid (ZnTe) liegt die niedrigste TO-Schwingung bei 5.3 THz, dort zeigt

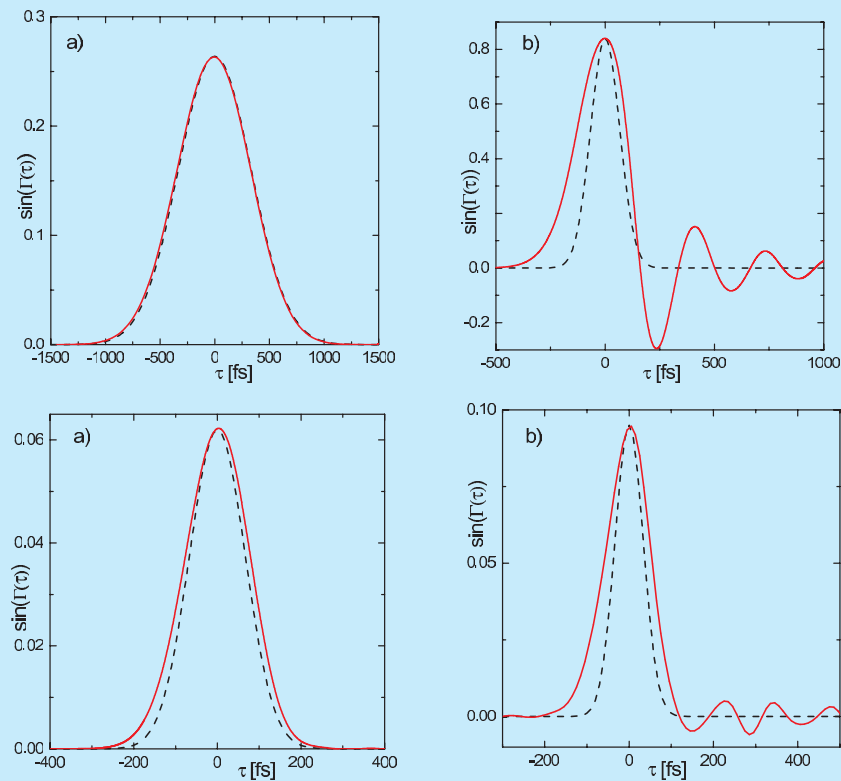


Abbildung 75: Erwartetes Signal im Diodendetektor des EOS-Aufbaus (durchgezogene Kurven) im Vergleich zu Originalform des Bunches (gestrichelte Kurven).
 Obere Bilder: ZnTe-Kristall von 300 μm Dicke; links: $\sigma = 100 \mu\text{m}$, rechts: $\sigma = 20 \mu\text{m}$.
 Untere Bilder: GaP-Kristall von 100 μm Dicke; links: $\sigma = 20 \mu\text{m}$, rechts: $\sigma = 10 \mu\text{m}$

der Brechungsindex ein resonanzartiges Verhalten. Es sind detaillierte numerische Studien zur Signalverbreiterung und -verformung in elektro-optischen Kristallen durchgeführt worden um zu ermitteln, ob ultrakurze Elektronen-Bunche noch unverfälscht rekonstruiert werden können. Bei ZnTe beginnt eine merkliche Verbreiterung für Pulslängen von weniger als 30 μm (rms). Der TiSa-Laser-Puls wird ebenfalls breiter und hat eine geringere Gruppengeschwindigkeit als der THz-Puls. Die Verbreiterung und die verschiedenen Gruppengeschwindigkeiten haben eine Signalverzerrung im Diodendetektor zur Folge, siehe Abbildung 75.

Es zeigt sich, dass ein gaußförmiger Elektronen-Bunch mit $\sigma \geq 40 \mu\text{m}$ perfekt durch die elektro-optische Abtastung in ZnTe rekonstruiert werden kann. Kürzere Bunche erscheinen dagegen verlängert, bei $\sigma = 20 \mu\text{m}$ fast um einen Faktor 2, und außerdem entwickeln sich Oszillationen, die man durch resonante Verstärkung der Fourierkomponenten nahe der TO-Gitterschwingung erklären kann.

Gallium-Phosphid (GaP) hat seine niedrigste TO-Schwingung bei 11 THz und ermöglicht daher die Messung von kürzeren Pulsen. Der 20 μm -Puls wird bei Abtastung in GaP praktisch originalgetreu wiederge-

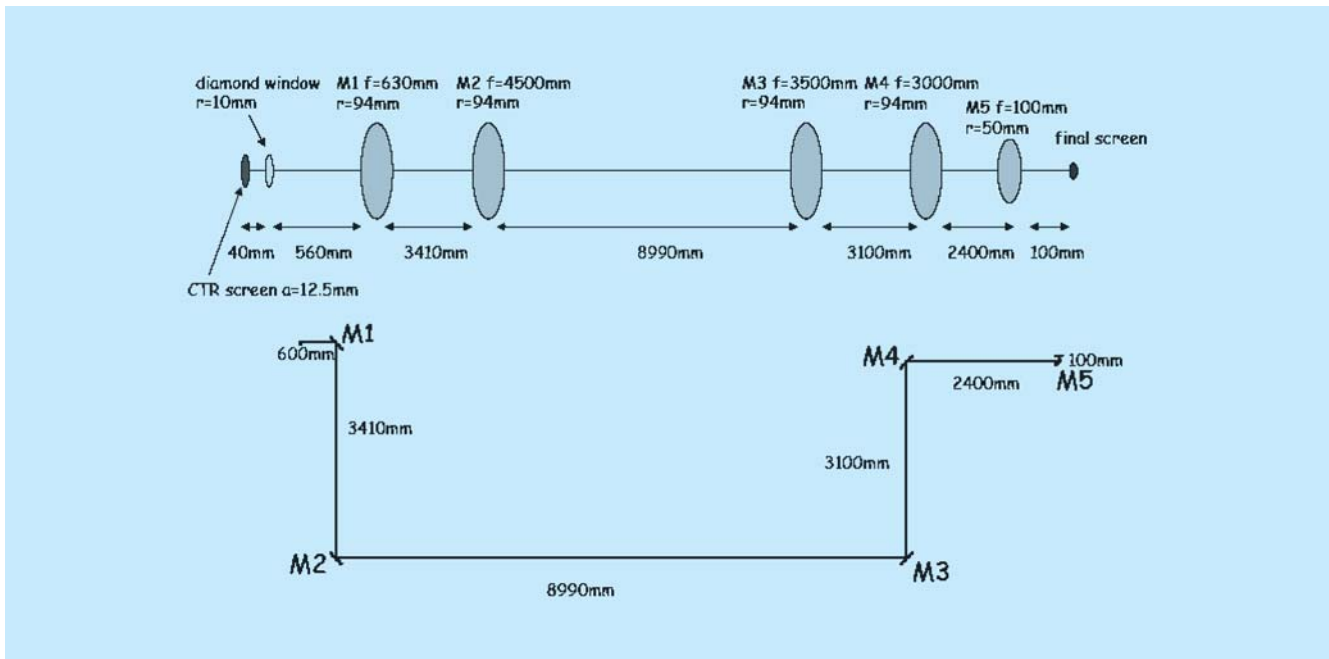


Abbildung 76: Schematische Darstellung der Auskopplung der THz-Strahlung und des optischen Transportweges vom Beschleunigerbereich bis in die Messhütte.

geben, erst ein Puls mit $\sigma = 10 \mu\text{m}$ erscheint deutlich breiter. Die kürzeste Halbwertsbreite, die mit ZnTe als EO-Kristall aufgelöst werden kann, beträgt 200 fs, bei GaP sind es 100 fs. Allerdings ist der elektro-optische Koeffizient von GaP um einen Faktor 8 kleiner, und die Detektorsignale sind entsprechend niedriger. Am EOS-Aufbau an der 140 m-Position des VUV-FEL Linacs sollen ZnTe, GaP und evtl. andere elektro-optische Materialien verglichen werden.

Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung

Die Spektroskopie der kohärenten Übergangsstrahlung im THz-Bereich ist eine Methode, die Zeitstruktur der Elektronenbunche auf der Skala von 10–100 fs zu studieren. Dieser Zeitbereich ist mit elektro-optischen Techniken kaum zugänglich. Um die im Beschleunigervakuum erzeugte Übergangs- oder Diffraktions-

strahlung optimal für Diagnosezwecke nutzen zu können, ist es zweckmässig, die Strahlung aus dem Beschleunigerbereich herauszuführen. Zu diesem Zweck wurde eine quasi-optische Strahlführung auf der Basis von Metallspiegeln entwickelt, die es erlaubt, THz-Strahlung von 0.2 THz bis 30 THz mit hoher Effizienz vom Beschleunigerbereich in eine externe Messhütte zu leiten. Die Strahlführung ist so ausgelegt, dass sowohl Messungen der spektralen Intensitätsverteilung als auch zeitaufgelöste Messungen mit EO-Techniken oder Streak-Kameras möglich sein werden.

Die Propagation der THz Strahlung durch das optische System wird auf Grund der langen Wellenlängen ($10 \mu\text{m}$ bis 1 mm) wesentlich durch Beugungseffekte an den Strahlbegrenzungen und den optischen Elementen bestimmt. Da kommerziell verfügbare Computerprogramme sich in diesem Wellenlängenbereich als unzureichend erwiesen, die Details der Beugungsphänomene korrekt zu beschreiben, wurde ein eigenes *Mathematica* Programmpaket zur Lösung dieses Problems entwickelt.

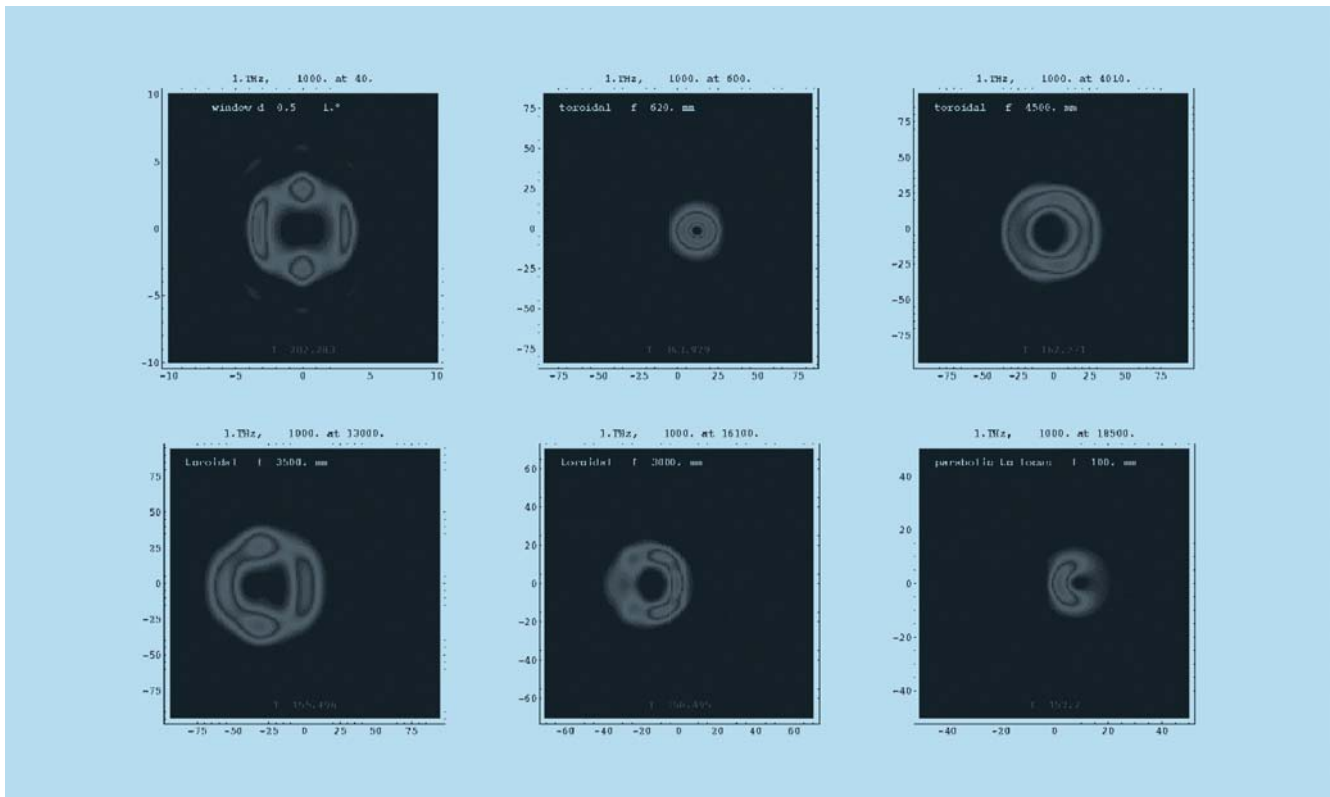


Abbildung 77: Intensitätsverteilung der kohärenten Übergangsstrahlung auf den optischen Elementen der THz-Strahlführung (Diamantfenster und fünf Spiegel).

Das Programm *THz-Transport* umfasst die Behandlung von Nah- und Fernfeldbeugung und erlaubt die Beschreibung von sphärischen, elliptischen, parabolischen und toroidalen Spiegelementen. Zudem können planparallele und keilförmige Fenster erfasst werden. Basierend auf Berechnungen mittels dieses Programms, dessen Entwicklung ca. 8 Monate in Anspruch nahm, wurden die Metallspiegel der Strahlführung und das Diamantfenster zur Auskopplung der

THz-Strahlung aus dem Beschleunigervakuum optimiert. Diese Komponenten wurden inzwischen bestellt und befinden sich in der industriellen Fertigung. Die Anordnung der optischen Elemente ist schematisch in Abb. 76 dargestellt (planare Spiegel sind nicht gezeigt), Abb. 77 zeigt exemplarisch die berechnete Intensitätsverteilung auf den optischen Elementen für eine Wellenlänge von 0.3 mm ($f = 1 \text{ THz}$).