Bereich Forschung (F)

Inhalt

31
37
49
63
75
87
95
107
119
127
133
137
141

Übersicht F-Bereich

HERA Experimente

Der Berichtszeitraum stand diesmal ganz im Zeichen des Umbaus von HERA zur Luminositätserhöhung. Ein Luminositätsbetrieb mit Datennahme der Experimente fand deshalb nicht statt. Um die zu erwartende hohe Luminosität bei HERA optimal zu nutzen, wurden wesentliche Verbesserungen und Ausbauarbeiten an allen vier HERA-Detektoren H1, ZEUS, HERMES und HERA-B durchgeführt. Die teilweise sehr aufwendigen und komplexen technischen Arbeiten wurden rechtzeitig zum Wiederanlaufen von HERA fertig gestellt – erste Tests zeigen, dass die Umbauarbeiten erfolgreich waren.

Basierend auf den 1992–2000 genommenen Daten wurde von den HERA-Kollaborationen eine größere Anzahl neuer wissenschaftlicher Ergebnisse vorgestellt. Zu den bemerkenswertesten Resultaten zählen:

- Die detaillierte Analyse der jetzt hochpräzisen Bestimmung der Protonstrukturfunktion F₂ ergibt, dass sich das Anwachsen der Partondichten im Proton selbst zu den kleinsten Werten der Partonimpulse x fortsetzt und die Daten im Rahmen der perturbativen QCD (Quantenchromodynamik) höherer Ordnung beschrieben werden können,
- die Messung des Werts und der Skalenabhängigkeit der starken Kopplungskonstante, des fundamentalen Parameters der QCD, mit verschiedenen Methoden und höchster Genauigkeit,
- die Eröffnung des neuen Forschungsgebietes der verallgemeinerten Partonverteilung durch die Messung exklusiver Teilchenreaktionen wie ep → eγp, von denen man sich ein neues Verständnis der QCD bei großen Abständen – also im nicht-perturbativen Bereich – erhofft,
- die empfindliche Suche nach Effekten jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik, vor allem nach

neuen Kräften und Teilchen wie angeregte Leptonen, angeregte Quarks und supersymmetrische Teilchen; die gefundenen Grenzen sind vielfach strenger als die an anderen Beschleunigern wie LEP und TEVATRON gewonnenen.

Auch das HERA-B Experiment, das als letztes der vier HERA-Experimente im Jahre 2000 erstmals Daten mit dem vollständigen Detektor genommen hat, hat erste, vorläufige physikalische Ergebnisse vorgestellt: den Wirkungsquerschnitt für die Erzeugung von Teilchen mit der Quantenzahl Beauty für einlaufende Protonen und den differentiellen Wirkungsquerschnitt für J/ψ-Erzeugung.

Neutrino-Astrophysik

Im Berichtsjahr konnte der AMANDA Detektor, der das Eis des Südpols zum Nachweis hochenergetischer Neutrinowechselwirkungen verwendet, erfolgreich betrieben werden, und es wurde eine Anzahl von interessanten Ergebnissen zur Messgenauigkeit des Detektors, zu atmosphärischen Neutrinos, Neutrinos von Punktquellen sowie der Suche nach magnetischen Monopolen und WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles) veröffentlicht. Damit ist die Leistungsfähigkeit des AMANDA-Konzepts eindrucksvoll demonstriert.

Um eine ausreichende Empfindlichkeit für hochenergetische kosmische Neutrinos zu erzielen, wird allerdings ein Detektor mit einem Volumen von 1 km³ benötigt. Ein entsprechender Vorschlag, IceCube, der aus 4800 Photoröhren an 80 Strings bestehen soll, wurde im Berichtsjahr von Physikern aus Belgien, Deutschland, Schweden und den USA ausgearbeitet. Der Vorschlag wurde von den entsprechenden Komitees in den USA, die den Großteil des Experiments und die Forschungsstation am Südpol finanzieren, begutachtet und empfohlen. Basierend auf der Empfehlung des DESY PRC (Physics Research Committee) hat das Direktorium die Teilnahme DESYs an IceCube entschieden. Der gegenwärtige Plan sieht vor, in der Saison 2003/04 drei Strings zu installieren und den gesamten Detektor im Jahre 2009 fertig zu stellen.

Vorarbeiten für TESLA

Im Frühjahr 2001 konnte von insgesamt 1134 Autoren aus 36 Ländern in einer großen gemeinsamen Anstrengung der "Technical Design Report" (TDR) für TESLA veröffentlicht und in einem Wissenschaftlichen Kolloquium am DESY, an dem etwa 1100 Wisssenschaftler teilnahmen, der Öffentlichkeit vorgestellt werden.

Seitdem konzentrieren sich die Arbeiten der Teilchenphysiker auf

- eine weitere Ausarbeitung des Physik-Programms von TESLA, besonders in Bereichen, die im TDR noch nicht ausreichend behandelt werden konnten,
- die Organisation konkreter Detektorentwicklungsprojekte, um die in den Vorarbeiten zum TDR aufgeworfenen technischen Fragen zu beantworten,
- und Planungen zu der Wechselwirkungszone und der experimentellen Infrastruktur.

ECFA, das European Committee for Future Accelerators, verlängerte das Mandat der ECFA/DESY Studie um zwei weitere Jahre mit dem Auftrag, die Studien zum physikalischen Potenzial eines Linear-Colliders mit einer Energie zwischen 90 und 800 GeV weiter auszuarbeiten. Die Gruppe FLC spielt weiterhin in dieser Studie eine zentrale Rolle.

Theorie der Elementarteilchen

In enger Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des II. Instituts für Theoretische Physik der Universität Hamburg und zahlreichen Gästen hat sich die DESY-Theoriegruppe auf folgende Themen konzentriert: Quantenchromodynamik (QCD), Flavour-Physik der schweren Quarks und Neutrinos, Higgs-Mechanismus, Gravitation, Zusammenhang von Teilchenphysik und Kosmologie, Stringtheorie, Gittereichtheorie und Mathematische Physik. Ebenso war die Gruppe zentral an der Ausarbeitung des TESLA TDR beteiligt.

Entwicklung massiv paralleler Rechner für die Gittereichtheorie

Zur Lösung von Problemen der theoretischen Teilchenphysik im Rahmen der Gittereichtheorie werden Spezialrechner mit außerordentlicher Rechenleistung benötigt. Im Berichtsjahr wurde die Installation der APEmille Rechner, die seit 1996 gemeinsam mit dem INFN (Italien) entwickelt werden, in Zeuthen abgeschlossen. Somit stehen der Gittereichtheorie-Community seit Sommer 2001 im Rahmen des NIC (John von Neumann Institut für Computing) 650 GFlops an Rechenleistung zur Verfügung. Allerdings kann damit nur etwa ein Drittel des in Deutschland vorhandenen Bedarfs gedeckt werden.

Um auch in Zukunft den wachsenden Bedarf an Rechenzeit befriedigen zu können, wird seit 2000 zusammen mit INFN und Orsay (Frankreich) der Nachfolgerechner apeNEXT entwickelt. Ziel ist es, bis etwa Ende 2002 einen Prototyp mit einer Rechenleistung von 500 GFlops bei Serienproduktionskosten von 1 MFlop/0.5 Euro zu entwickeln. Auf dieser Basis ließe sich eine Installation von mehreren TFlops in den Jahren 2003/04 in Zeuthen realisieren.

HASYLAB

Im Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASY-LAB wird die von Positronen bzw. Elektronen in den Speicherringen DORIS III und PETRA II emittierte Synchrotronstrahlung in vielfältiger Weise in Grundlagen- und anwendungsbezogener Forschung auf den Gebieten der Physik, Biologie, Chemie und Kristallographie, in den Material- und Geowissenschaften sowie der Medizin eingesetzt. Dabei wird das weite Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom sichtbaren Licht bis zum harten Röntgengebiet genutzt und ein Energiebereich von etwa 1 eV bis zu 300 keV überstrichen.

Im Rahmen eines wissenschaftlichen Kolloquiums im März 2001 bei DESY wurden die wissenschaftlichen Perspektiven und die technische Realisierung von TESLA vorgestellt, wie sie auch im Technical Design Report nachzulesen sind. Das Treffen mit mehr als 1000 Teilnehmern, 40% davon aus dem Ausland, hat durch die neuen Forschungsmöglichkeiten, die durch den Linearbeschleuniger und das X-Ray Free Electron Laser (X-FEL) Labor in Reichweite kommen, eine ungewöhnliche Aufregung hervorgerufen.

Am Freie-Elektronen Laser der TESLA Test Facility (TTF) wurde die Sättigung des SASE Prozesses am 10. September 2001 bei 98 nm erreicht. Dies ist die kürzeste Wellenlänge, die bisher von einem Freie-Elektronen Laser erreicht wurde. Die Pulsleistung von 1 GW wurde erreicht bei einer Pulslänge von 30–100 fs, die gemessene Pulsbrillanz von 10^{28} Photonen/(sec \cdot mrad² \cdot mm² \cdot 0.1% Bandbreite) ist tatsächlich um neun Größenordnungen größer als der Wert, der heutzutage an den besten Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation in diesem Wellenlängenbereich erreicht werden kann. Die mittlere Leistung betrug ungefähr 5 mW, die mittlere Brillanz 10^{17} Photonen/(sec · mrad² · mm² · 0.1% Bandbreite). Die Strahlung wurde sorgfältig charakterisiert und alle Ergebnisse stimmen sehr gut mit der Theorie überein. Dieser Erfolg wird weltweit als ein Durchbruch auf dem Weg zum 0.1 nm Röntgenlaser gesehen.

Bereits wenige Wochen nach dem Erreichen der Sättigung am TTF FEL wurden erste Ablationsexperimente erfolgreich durchgeführt. Die gemessene Schwelle für die Schädigung von Spiegelmaterialien bei der Festlegung der Beamlines und der optischen Komponenten für die VUV FEL Nutzereinrichtung, die im Jahr 2004 verfügbar sein wird, ist höher als angenommen wurde. In einem weiteren Experiment wurde die Coulomb-Explosion an freien Xenon-Clustern untersucht. Dabei konnte die FEL-Strahlung auf einen Strahldurchmesser von 20 µm am Probenort fokussiert werden, so dass 10¹⁵ Photonen in Lichtblitzen von etwa 50 Femtosekunden zur Verfügung stehen.

Elektronik-Entwicklung

Die Gruppen "Elektronik Entwicklung" (FE) mit besonderer Expertise auf den Gebieten digitale Datenverarbeitung (FEA), analoge Signalverarbeitung (FEB), Opto- und Mikroelektronik (FEC), spezielle Softwareentwicklungen (FEE) sowie die Service-Gruppe (FEPOS) haben wesentlich dazu beigetragen, dass die Umbauarbeiten von HERA und der HERA-Experimente rechtzeitig und erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Besonders hervorzuheben sind die Beiträge zum ZEUS Luminositätsmonitor, ein universeller Timing Modul für das H1-Experiment sowie ein Transientenrekorder und ein Alarmsystem für den HERA Elektronenring. Gemeinsam mit der Gruppe FDET wurde an der Automatisierung der longitudinalen Emittanz-Messung bei TTF (TESLA Test Facility) gearbeitet. Für HASYLAB wurden das Datennahmesystem und die Datenverarbeitungselektronik des Silizium-Driftdetektorsystems im Berichtsjahr fertig gestellt.

Bibliothek und Dokumentation

Die Gruppe "Bibliothek und Dokumentation" sammelt die von den DESY-Mitarbeitern benötigte Fachliteratur, insbesondere zur Teilchenphysik und Beschleunigertechnik.

Die gesamte Literatur zur Hochenergiephysik wird in enger Zusammenarbeit zwischen den Bibliotheken des Stanford Linear Accelerator Center SLAC und DESY dokumentarisch bearbeitet und in der Literaturdatenbank HEP (High Energy Physics), die Dokumente ab Anfang der siebziger Jahre enthält, bereitgestellt. Sie wird täglich aktualisiert und ist im World Wide Web (WWW) zugänglich.

Die Gruppe verwaltet auch das Berichts- und Veröffentlichungswesen von DESY und nimmt die Aufgaben des "Verlags Deutsches Elektronen-Synchrotron" wahr.

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Der Dialog mit der Öffentlichkeit ist eine Herausforderung, die von DESY gern und mit großem Einsatz angenommen wird. Die Abteilung "Presse- und Öffentlichkeitsarbeit" (PR) erfüllt hier die Funktion einer "Schnittstelle" und sorgt für den erforderlichen Informationsfluss. In zunehmendem Maße gewinnt hierbei die Kommunikation des TESLA-Projekts an Bedeutung und fordert verstärkten Einsatz. Ein zentrales Ereignis zu TESLA im Berichtsjahr war die Veröffentlichung des "Technical Design Reports" am 23. März im Rahmen eines zweitägigen Kolloquiums "Scientific Perspectives and Technical Realisation of TESLA", für das ein aufwendiges Presse- und Informationsangebot erstellt wurde.

Neben solchen Schwerpunkt-Projekten pflegt die PR-Gruppe ein aktuelles und vielfältiges Spektrum an Informationsangeboten und Kommunikationsmaßnahmen. Dazu gehören die Herausgabe von Informationsschriften für einen breiten Leser- und Interessentenkreis sowie der weit gefächerte Kontakt zu den Medien, der steigende Bedeutung im Tagesgeschäft erhält. Des Weiteren gehören die regelmäßige Durchführung von Besichtigungen zur PR-Arbeit (2001 kamen über 9000 Besucherinnen und Besucher in 394 Einzelgruppen zu DESY, davon 230 Schülergruppen und 60 Studentengruppen), ebenso die Präsentation DESYs auf Messen und Ausstellungen. Dazu gehört auch, ständig für allgemeine, von außen an DESY herangetragene Anfragen ansprechbar zu sein sowie die bei DESY arbeitenden Menschen über Neues aus den verschiedenen Bereichen des Zentrums zu informieren.

Im September 2001 wurde von Hamburgs Schulsenatorin Ute Pape im Rahmen des Programms physik.begreifen@desy.de ein neuer Experimentierbereich für Schulklassen zum Thema Radioaktivität am DESY Gelände eingeweiht. Im Berichtsjahr nutzten etwa 1650 Schülerinnen und Schüler das Experimentierangebot von physik.begreifen@desy.de.



Abbildung 2: Die neuen Vorwärtsspurkammern vor dem Einbau in den H1-Detektor.

H1-Experiment

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

Sprecher: E. Elsen, DESY

Nach dem Ende der erfolgreichen Datennahme der HERA I Phase im Jahr 2000 konzentrierten sich die Aktivitäten der H1-Kollaboration auf die Analyse dieser Daten und den Abschluss der umfangreichen Erweiterungsarbeiten am Detektor (Abb. 2).

Im Berichtsjahr 2001 hat die H1-Kollaboration 11 wissenschaftliche Arbeiten mit folgenden Schwerpunkten publiziert:

Die Beobachtung, dass die in inklusiver tiefunelastischer Elektron-Proton Streuung (DIS) gemessene Strukturfunktion des Protons zu kleinen relativen Impulsanteilen x der Quarks im Proton stark anwächst, stellt ein Hauptresultat der HERA I Phase dar. Eine detaillierte Analyse der jetzt hochpräzisen Daten ergibt, dass sich dieser Anstieg selbst zu den kleinsten Werten von x fortsetzt.

Ein Schwerpunkt der Physikanalysen lag im Vergleich der Messungen mit Vorhersagen der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung. Die Wirkungsquerschnitte für die Produktion von Teilchenjets können sehr zufriedenstellend durch QCD-Rechnungen beschrieben werden, falls diese in nächstführender Ordnung der starken Kopplungskonstante α_s durchgeführt werden. Der Wirkungsquerschnitt für die Produktion von Charm-Quarks ist direkt empfindlich auf die Gluonen im Proton. Es zeigt sich, dass die aus inklusiven DIS-Messungen gewonnene Information über die Gluondichte im Rahmen der QCD-Rechnungen einen Charm-Anteil an der Proton-Strukturfunktion vorhersagt, der sehr gut mit den direkten Messungen übereinstimmt.

Eine Klasse von Ereignissen, bei denen das Proton bei der Streuung unversehrt bleibt, findet besonderes Interesse bei HERA. Neue Daten, die einen großen Bereich in der Energie des gestreuten Protons überstreichen, ergaben genauere Aufschlüsse über die Mechanismen dieser Streuprozesse. Ereignisse, bei denen neben gestreutem Proton und Elektron nur ein Photon erzeugt wird, erlauben es, Unsicherheiten in der Modellierung des erzeugten Endzustandes auszuschließen.

In mehreren Veröffentlichungen wurde über die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells berichtet. Die Suche konzentrierte sich primär auf neue Elementarteilchen wie angeregte Leptonen und Quarks, Leptoquarks und supersymmetrische Teilchen. Die große akkumulierte Luminosität ergab bei Verfügbarkeit von sowohl e⁻p als auch e⁺p Streudaten wesentlich höhere Sensitivitäten als vorhergehende Messungen bei HERA. Es wurden keine Anzeichen für die Existenz solcher Teilchen in dem bei HERA zugänglichen Massenbereich gefunden. Es konnten Obergrenzen für Produktionsraten abgeleitet werden, die, verglichen mit den an anderen Beschleunigern wie LEP und TEVATRON gewonnenen Grenzen, oft einschränkender sind.

Der H1-Detektor für HERA II

Die geplanten Ausbauarbeiten am H1-Detektor sind in der ersten Jahreshälfte durchgeführt worden, so dass die Eisenschalen des Magneten Mitte Juli 2001 nach ausführlichen Tests der beiden neuen supraleitenden Strahlführungsmagnete innerhalb des Detektors geschlossen werden konnten.

Alle zentralen Detektorkomponenten sind anschließend mit Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung erfolgreich getestet worden. Dabei lieferte auch die neue zentrale innere Vieldrahtproportionalkammer CIP erste Triggersignale.

Anfang Oktober konnten mit dem neuen Luminositätsmonitor die Bremsstrahlungs-Photonen der ersten Kollisionen bei HERA II beobachtet werden. Die Kalibrierung des Detektors und die Echtzeitprogrammierung sind seitdem weit fortgeschritten, so dass ab Anfang 2002 die Luminosität von HERA mit Präzision gemessen werden kann.

Bei den ersten Versuchen, den zentralen Detektor im Strahlbetrieb einzuschalten, wurde selbst bei relativ kleinen Strahlströmen ein hoher Strahlungsuntergrund beobachtet. Es wurden intensive Studien zur Optimierung der Strahllage durchgeführt, die noch nicht abgeschlossen sind. Für höhere Strahlströme muss der Untergrund noch reduziert werden. Dazu werden Anfang 2002 zusätzliche Kollimatoren gegen Synchrotronstrahlung installiert. Der protoninduzierte Untergrund wird sich im Laufe der Zeit durch Verringerung der Restgaskonzentration reduzieren.

Als weitere neue Detektorkomponente hat der schnelle Spurtrigger FTT im Herbst 2001 mit dem erfolgreichen Test eines Prototyps auch den dritten Meilenstein passiert und befindet sich jetzt in der Serienproduktion. Er soll im Sommer 2002 in Betrieb genommen werden.

Für die in den Jahren 1996 bis 2000 aufgenommenen Daten wurde die Kalibration und relative Orientierung der zentralen Spurdetektoren (Driftkammern in r φ und z und ab 1997 ein Siliziumstreifendetektor) neu bestimmt. Dabei kam ein neuartiges Verfahren der linearen Ausgleichsrechnung zur Anwendung, das die Berechnung von mehreren hundert Kalibrationsparametern aus Anpassungen an einige zehntausend Spuren ermöglicht. Anschließend wurden alle Daten innerhalb



Abbildung 3: Massendifferenz $\Delta m = m(K^-\pi^+\pi^+_{slow}) - m(K^-\pi^+)$ bei der Suche nach D*-Kandidaten. Die neue Kalibration der zentralen Spurdetektoren (Kreuze und dicke Linie) verbessert die Massenauflösung um 25% relativ zur früheren Kalibration (Punkte und dünne Linie).

weniger Wochen mit diesen Konstanten auf einer Multiprozessorfarm von Linux PCs analysiert. Als Beispiel für die verbesserte Messgenauigkeit ist die Massendifferenz $\Delta m = m_{K^-\pi^+\pi^+_{slow}} - m_{K^-\pi^+}$ in der Zerfallskette $D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+_{slow}$ und $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ in Abbildung 3 dargestellt.

HERA II wird erstmals auch für die Experimente H1 und ZEUS longitudinal polarisierte Elektronenstrahlen zur Verfügung stellen. Da einige ep Wirkungsquerschnitte ganz empfindlich von der Polarisation abhängen, muss deren Wert für jedes einzelne Strahlpaket und zu jedem Zeitpunkt mit großer Präzision gemessen werden. Dazu soll im Jahr 2002 das jetzt im Bereich des HERMES Experiments aufgebaute Polarimeter um ein neues Instrument ergänzt werden. Dabei nutzt man aus, dass die Energie eines am Elektronenstrahl gestreuten, zirkular polarisierten Photons von der longitudinalen Polarisation des Strahls abhängt. Dieses Gerät erzielt die nötige Intensität des Photonenstrahls mit einem Trick: der Laserstrahl wird einfach zwischen den Spiegeln einer Kavität (Abb. 4) mehrere zehntausendmal hin- und hergeworfen. Die Arbeiten an der Vorbereitung dieses Interferometers, das hohe Anforderungen an die mechanische Stabilität stellt, sind im Labor in Orsay intensiv vorangetrieben worden: der Testaufbau des Interferometers konnte erfolgreich betrieben werden.



Abbildung 4: Der Aufbau des geplanten Polarimeters zum Nachweis der longitudinalen Polarisation. Ein zirkular polarisierter Laserstrahl wird quasi zwischen den Spiegeln des Interferometers gespeichert und so die Intensität des Strahls um mehrere Größenordnungen erhöht. Im Mittel streuen mehrere Photonen an jedem einzelnen Paket des Elektronenstrahls, so dass aus der Energie-Asymmetrie der gestreuten Photonen im entfernten Kalorimeter die longitudinale Polarisation mit einer Präzision von besser als 1% pro Paket bestimmt werden kann. Die Spiegel sind in einem Vakuumtank untergebracht, der über eine optische Bank aktiv von den Bodenbewegungen im HERA-Tunnel entkoppelt wird.

Physikalische Ergebnisse

Der Anstieg der Strukturfunktion F₂

Das Verhalten der Proton-Strukturfunktion F_2 bei höchsten Energien ist eine der wichtigen offenen Fragen der Quantenchromodynamik (QCD). Die H1-Kollaboration hatte im Jahr 2000 über Messungen der Strukturfunktion F_2 berichtet. Dabei wurden in der tiefunelastischen inklusiven Elektron-Proton-Streuung Ereignisse bei großen Photon-Virtualitäten Q² registriert. Es gelang, den bei HERA schon in früheren Jahren entdeckten Anstieg der Proton-Strukturfunktion F_2 mit zuvor unerreichter Genauigkeit zu vermessen. Dieser Anstieg zu kleinen Werten der Bjorken-Variablen x (relativer Quarkimpuls im Proton) wird in der QCD als Zunahme der Dichte der bei diesen Stößen wirksamen Quarks und Gluonen im Proton interpretiert.

In den letzten Jahren wurde die Frage stark diskutiert, ob sich dieser zu kleinen x hin beobachtete Anstieg unvermindert fortsetzt, oder ob schon bei den gegenwärtigen Energien Sättigungseffekte beobachtet werden, wie sie für hohe Gluondichten theoretisch vorausgesagt wurden.



Abbildung 5: Anstieg der Proton-Strukturfunktion F_2 zu kleinen x. a) Beispiele für $F_2(x)$ bei verschiedenen Q^2 im Vergleich mit den Ergebnissen einer QCD-Analyse. b) und c) Resultierende λ und c aus Anpassungen der Form $F_2 = c x^{-\lambda}$ an die F_2 -Daten mit x < 0.01 für verschiedene Q^2 . Die Geraden stellen das Ergebnis einer linearen Anpassung an die λ -Resultate und das mittlere c dar.

Die H1-Kollaboration hat deshalb die im Jahre 2000 vorgelegten Daten einer Prüfung speziell unter diesem Aspekt unterzogen. Es zeigte sich, dass die logarithmische Steigung von F_2 bei festem Q^2

$$\lambda = -(\partial \ln F_2 / \partial \ln x)_{Q^2}$$

im untersuchten Q² Bereich von etwa 2 bis $150 \,\text{GeV}^2$ bei kleinen Werten von x (x < 0.01) im Rahmen der Messgenauigkeit unabhängig von x ist. Dies bedeutet, dass die Messungen mit dem einfachen Verhalten

$$F_2 = c(Q^2) x^{-\lambda(Q^2)}$$

verträglich sind.

Der Anstieg der Strukturfunktion zu kleinen x nimmt mit Q² zu, wie die Beispiele für verschiedene Q² in Abbildung 5a) zeigen. Anpassungen von c(Q²) und λ (Q²) an die F₂-Ergebnisse für x < 0.01 ergeben, dass die Strukturfunktion durch λ (Q²) = a · ln[Q²/\Lambda²] (a = 0.0481, Λ = 292 MeV) und mit konstantem c = 0.18 beschrieben werden kann (Abb. 5b) und c)).

Die Strukturfunktion lässt sich also im untersuchten tiefunelastischen Bereich durch ein Potenzverhalten sehr einfach darstellen. Eine Änderung des fraktalen Verhaltens im Bereich der höchsten Quark-Gluondichten wird nicht beobachtet.

Produktion von Teilchenjets

Während die Quantenchromodynamik inklusive tiefunelastische Streuprozesse (ep \rightarrow eX) mit einiger Präzision beschreibt, sind Berechnungen für detailliertere Studien des hadronischen Endzustandes mit größeren Unsicherheiten behaftet. Theoretische Wirkungsquerschnitte werden über Störungsrechnungen, das heißt Entwicklungen in Potenzen der starken Kopplungskonstante α_s , berechnet. Das notwendige Abbrechen der Störungsreihe kann zu beträchlichen Unsicherheiten (Skalenunsicherheit) in der Vorhersage führen. Zum Beispiel sind für die 2-Jet Produktion in DIS Berechnungen nur in nächstführender Ordnung (NLO) verfügbar, das heißt in der zweiten Ordnung von α_s $(O(\alpha_s^2))$. Diese Rechnungen waren benutzt worden, um die Gluondichte im Proton und den Wert von α_s zu ermitteln. Die Präzision, mit der insbesondere α_s bestimmt werden konnte, war begrenzt durch die Kenntnis der Protonstruktur und durch die Skalenunsicherheit.

Im Berichtsjahr waren jedoch zum ersten Mal QCD-Rechnungen für die 3-Jetproduktion in nächstführender Ordnung (O(α_s^3)) verfügbar. In Abbildung 6 sind diese Rechnungen mit der ersten Messung des 3-Jet Wirkungsquerschnittes in DIS verglichen. Die H1 Daten, gezeigt als Verhältnis der 3-Jet zur 2-Jet Rate, sind sehr gut durch die $O(\alpha_s^3)$ -Rechnung beschrieben, während Rechnungen in führender Ordnung $O(\alpha_s^2)$ sehr deutliche Abweichungen zeigen. Dies ist der erste - und erfolgreiche - quantitative Test von QCD-Rechnungen der Ordnung $O(\alpha_s^3)$ in hadronischen Kollisionen. Die Fehler der H1 Datenpunkte sind vorwiegend statistischer Natur und können deshalb verkleinert werden, wenn mehr Daten zur Verfügung stehen. Dies eröffnet die Möglichkeit einer sehr präzisen Messung der fundamentalen Naturkonstante α_s , wie man in Abbildung 6 am Vergleich der jetzigen Messfehler mit dem dunklen Band, das eine Variation von α_s um etwa 5% darstellt, sieht.

In einer weiteren Analyse wurde die Produktion von Jets bei sehr kleinen Virtualitäten Q^2 des ausgetauschten Photons (Photoproduktion) untersucht. In diesem Bereich erwartet man, dass das Photon erst in ein partonisches System aus Quarks und Gluonen fluktuieren kann, bevor der harte Streuprozess der Jet-Produktion stattfindet. Diese Fluktuation kann im Gegensatz zum



Abbildung 6: Verhältnis $R_{3/2}$ des 3-Jet zu 2-Jet Wirkungsquerschnittes in tiefunelastischer ep-Streuung als Funktion der Virtualität Q^2 im Vergleich zu QCD-Rechnungen in führender (LO) und nächstführender (NLO) Ordnung. Die Bänder beschreiben theoretische Unsicherheiten der Berechnungen.

harten Streuprozess nicht störungstheoretisch berechnet werden, sondern muss durch die Einführung von Partondichten im Photon parametrisiert werden. Abbildung 7 zeigt den 2-Jet Wirkungsquerschnitt bei $Q^2 \approx 0$ für verschiedene Regionen der relativen Impulsbruchteile x_p (x_v) der Partonen aus dem Proton (Photon), die die harte Produktion der zwei Jets bewirken. Auch in diesem schwierigen Fall ist die QCD-Rechnung in der Lage, die Messungen zu beschreiben, obwohl die Partondichte im Photon aus einem ganz anderen Prozess, nämlich der Reaktion $\gamma^* \gamma \rightarrow X$ bei LEP bestimmt wurde. Wie Abbildung 7 zeigt, erstreckt sich die Messung auch auf hohe Werte von x_p und eignet sich somit für eine Bestimmung der Protonstruktur in diesem x_p-Bereich, der sonst nur durch inklusive DIS-Messungen oder durch Messungen der Jet-Wirkungsquerschnitte am Tevatron pp-Collider zugänglich ist.

Prozesse mit unversehrten Protonen

Von besonderem Interesse unter den ep-Streuprozessen sind solche, aus denen das Proton unversehrt hervorgeht. Diese Reaktionen stellen einen beträchtlichen



Abbildung 7: Wirkungsquerschnitte für 2-Jet Photoproduktion als Funktion des relativen Partonimpulses x_p im Proton für zwei Bereiche des relativen Partonimpulses x_γ im Photon. Die Daten sind mit QCD-Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO) verglichen.

Anteil des totalen Wirkungsquerschnitts dar. Wenn der Energieverlust des Protons gering ist, spricht man in Analogie zur Optik von "diffraktiven" Ereignissen ("Pomeron-Austausch", P). Werden jedoch Quanten-



Abbildung 8: Der Wirkungsquerschnittfür den Prozess $\gamma p \rightarrow pX$, in dem das unversehrte Proton mit Energie $E'_p = zE_p$ explizit nachgewiesen wird. Bei einer festen Schwerpunktsenergie W = 187GeV ist der Querschnitt verglichen mit der Erwartung (Total), die man mit weitergehenden Annahmen aus Hadron-Hadron-Stößen ableiten kann. Zum Tragen kommen dabei Einzelbeiträge von Austauschteilchen (R,P und π), die getrennt angegeben sind. Angesichts der Normierungsunsicherheiten eines solchen Vergleichs ist die Beschreibung befriedigend.

zahlen, Impuls und Drehimpuls übertragen, so spricht man im Rahmen der Regge-Phänomenologie vom Austausch von "Reggeonen", die Pionen (π) und weitere Mesonen (R) umfassen.

Nach früheren Messungen im Bereich geringen Energieverlustes des Protons wurde beim H1-Experiment jetzt der Photoproduktionsprozess für großen Energieverlust untersucht. Es zeigt sich, dass der Wirkungsquerschnitt dabei unabhängig von der Energie des ausgehenden Protons ist (Abb. 8). Dies ist überraschend, denn aus ähnlichen Untersuchungen in pp-Stößen weiß man, dass der Wirkungsquerschnitt sich aus einer komplexen Mischung von Reggeonen und Pomeronen zusammensetzt (Linien in Abb. 8). Offenbar ist in diesem Bild die Variation dieser Zusammensetzung bei HERA gerade so, dass sich insgesamt ein nahezu energieunabhängiger Streuquerschnitt ergibt.

Für hohe Photon-Virtualitäten Q^2 ist die laterale Ausdehnung des Photons γ^* begrenzt und in der Regel kleiner als die des Protons. In diesen Fällen sollte das anschauliche Bild der Diffraktion, in dem Photon und Proton als Ganzes beitragen, nicht mehr gültig sein, da die relevanten Abmessungen zu unterschiedlich sind. Trotzdem beobachtet man auch in diesem Fall unversehrte Protonen im Vorwärtsdetektor. Der Anteil dieser Prozesse scheint sogar zu steigen, wenn die transversale



Abbildung 9: Der Anteil der Prozesse mit unversehrten Protonen f_{LP} am Gesamtwirkungsquerschnitt als Funktion der Virtualität des Photons Q^2 für einen festen Wert der relativen Energie des auslaufenden Protons z. Die Datenpunkte beziehen sich auf die angegebenen Schwerpunktsenergien W.

Dimension des virtuellen Photons abnimmt (je größer Q^2 umso kleiner die Abmessungen) (Abb. 9). Das Bild, in dem Reggeonen und Pomeronen aus dem Proton an das Photon koppeln, hätte ein konstantes Verhältnis erwarten lassen.

Ein besonders einfacher Prozess mit unversehrten Protonen ist die Erzeugung eines Photons ($\gamma^* p \rightarrow \gamma p$). Wenn das Photon vom Positron im Ladungsfeld des Protons abgestrahlt wird, spricht man von "Bethe-Heitler"-Prozessen, die im Rahmen der Quantenelektrodynamik (QED) wohlverstanden sind. Darüber hinaus kann ein Photon auch durch Wechselwirkung mit den Quarks des Protons erzeugt werden. Man spricht in diesem Fall von "tiefunelastischer Compton Streuung" (DVCS). Dieser Anteil am gesamten Wirkungsquerschnitt wurde erstmalig experimentell bestimmt (Abb. 10). Man macht sich dabei zunutze, dass die Polarwinkelverteilung von auslaufendem Elektron und Photon in beiden Prozessen unterschiedlich ist und



Abbildung 10: Der DVCS-Beitrag zum Wirkungsquerschnitt $\gamma^* p \rightarrow \gamma p$ als Funktion von Q^2 . Der Impulsübertrag auf das Proton ist in der Messung auf Werte $|t| < 1 \text{ GeV}^2$ beschränkt. Die Daten sind mit QCD inspirierten Modellrechnungen (FFS und DD) verglichen.

der Überschuss aus der Differenzmessung abgeleitet werden kann. Es gibt erste Ansätze, dieses Verhalten im Rahmen der QCD-Störungsrechnung zu verstehen: wenn das auslaufende Proton unversehrt bleibt, müssen mindestens zwei Gluonen mit unterschiedlichen Impulsanteilen an der Reaktion beteiligt sein. Die Häufigkeitsverteilung der Gluonen, oder genauer die korrelierten Impulsanteile, sind von größtem Interesse. Eine genaue Kenntnis dieser Anteile wird als Schlüssel zum Verständnis für eine Vielzahl weiterer Streuprozesse angesehen, zum Beispiel dann, wenn im Ausgangszustand andere Teilchen exklusiv erzeugt werden. Anders als bei diesen, wo immer ein gebundenes System von Quarks, und deren theoretische Unsicherheit, betrachtet werden muss, gibt es im Fall des Photons solche Komplikationen nicht. Der DVCS Prozess verspricht, weiterhin ein lohnendes Studienobjekt zu bleiben.

Produktion von Charm-Quarks in DIS

Aus den inklusiven Lepton-Proton Daten von H1 wurde bereits im Vorjahr die Gluonverteilung im



Abbildung 11: Charm-Erzeugung zur Proton-Strukturfunktion: a) H1 und ZEUS Daten, evaluiert im DGLAP-Schema, im Vergleich mit der Vorhersage einer DGLAP Anpassung an die inklusiven F_2 Daten (H1 NLO QCD). b) H1 Daten, evaluiert im CCFM-Schema, im Vergleich mit einer Vorhersage, die auf einer CCFM Anpassung an die inklusiven F_2 Daten basiert.

Proton mit großer Präzision bestimmt. Die Gluonen wirken nur über die starke Wechselwirkung. Die Interpretation der Messergebnisse im Rahmen der QCD-Störungsrechnung basiert auf der Vorstellung, dass sich die Gluonen und der See aus virtuellen Quark-Antiquark-Paaren in einem Gleichgewicht befinden. Wenn dieses Bild richtig ist, so muss neben der Umwandlung der Gluonen in leichte Quark-Antiquark-Paare auch die Umwandlung in schwerere Quark-Antiquark-Paare (hauptsächlich Charm) eine Rolle spielen. Eine sehr direkte Signatur für die Streuung an einem Charm-Quark im Proton ist die Anwesenheit eines Mesons im Endzustand, das ein Charm-Quark enthält.

Es wurden Wirkungsquerschnitte für die Erzeugung von D*-Mesonen in einem gegenüber früheren H1-Messungen erweiterten kinematischen Bereich in x und Q² mit erhöhter Statistik gemessen. Daraus wurde der Beitrag F₂^c zur Strukturfunktion, der aufgrund von Charm-Anticharm-Quarks im Proton zustande kommt, direkt bestimmt. Abbildung 11a) zeigt einen Vergleich der gemessenen Werte mit einer Vorhersage, welche auf einer Gluondichte basiert, die aus einer NLO QCD-Anpassung an die präzisen inklusiven H1-Daten gewonnen wurde. Der hierbei zur Erzeugung der Charm-Quarks angenommene Mechanismus ist die Photon-Gluon-Fusion $(\gamma^* g \rightarrow c\overline{c})$. Die QCD macht keine explizite Vorhersage der x-Abhängigkeit von Partonverteilungen. Diese müssen daher experimentell aus den inklusiven Daten bestimmt werden. Dagegen erlaubt sie, die Q²-Entwicklung einer gegebenen Parton-Startverteilung beim Übergang in einen anderen kinematischen Bereich zu berechnen. Abhängig von den gemachten Vereinfachungen und Annahmen sind allerdings verschiedene Entwicklungsschemata entworfen worden.

Ein außerordentlich erfolgreiches Konzept ist die so genannte DGLAP-Entwicklung, mit der alle bisherigen H1-Daten über fast den gesamten kinematisch zugänglichen Bereich sehr gut beschrieben werden können. Sie liegt dem Vergleich in Abbildung 11a) zugrunde. Diese Überprüfung der verschiedenen Reaktionen auf ihre innere Konsistenz im Rahmen der QCD erweist sich als sehr erfolgreich, mit Ausnahme der Messpunkte bei kleinen x-Werten, wo die Daten deutlich oberhalb der Vorhersage liegen. Das DGLAP-Schema beschreibt zwar, wie sich die Partonverteilung bei einer Variation des räumlichen Auflösungsvermögens Q² ändert; es gibt jedoch starke theoretische Gründe für die Annahme, dass im Grenzfall kleiner x-Werte andere Näherungen besser sind.

Ein vielversprechender Ansatz ist das so genannte CCFM-Schema, da es die Vorteile einer Entwicklung in Q^2 (DGLAP) mit denen einer alternativen Entwicklung in 1/x kombiniert, indem es Interferenzeffekte bei der Abstrahlung von Multigluonen berücksichtigt. Abbildung 11b) zeigt, dass in der Tat die Beschreibung im Rahmen der gegenwärtigen experimentellen Unsicherheiten bei kleinen x-Werten im CCFM-Schema deutlich besser ist als im DGLAP-Schema.

Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Die bei HERA erreichbare hohe Energie im Schwerpunktssystem der kollidierenden Teilchen und die große akkumulierte Luminosität erlauben es, mit hoher Sensitivität nach Anzeichen völlig neuer Physik zu suchen. Hierbei ist wichtig, dass neben der Streuung von Positronen an Protonen auch Daten mit Elektronen in den Jahren 1998 und 1999 aufgenommen wurden. Die Kombination beider Datensätze ermöglicht noch detailliertere Suchen nach Physik jenseits des so genannten Standardmodells.

Zwei Publikationen berichten über die Suche nach Teilchen, die angeregte Zustände der uns bekannten Elementarteilchen, der Leptonen und Quarks, sind. Nach solchen Teilchen wird gesucht, weil die jetzt bekannten



Abbildung 12: Massenabhängige obere Grenzen (95% CL) für die Kopplungsstärke f/Λ angeregter Neutrinos v^{*}. Gezeigt sind Resultate aus der e⁺p- und e⁻p-Streuung bei HERA und aus der e⁺e⁻-Streuung bei LEP.

Teilchen nicht elementar, sondern aus Subkonstituenten aufgebaut sein könnten. In der Streuung hochenergetischer Leptonen an Protonen ließen sich dann angeregte Elektronen (e^*), Neutrinos (v^*) und Quarks (q^*) erzeugen, vorausgesetzt, dass ihre Masse Mf* im kinematisch zugänglichen Bereich liegt und die Kopplungsstärke dieser neuen Teilchen an bekannte Teilchen hinreichend groß ist. In den Datensätzen hoher Luminosität, die mit Positronen aufgenommen wurden, zeigen sich jedoch keine Anzeichen der Produktion angeregter Teilchen. Dies erlaubt Grenzen für das Produkt aus Produktionsrate und Zerfallswahrscheinlichkeit als Funktion der Masse M_{f*} zu gewinnen. Unter der Annahme, dass die Kopplungsstärke $f/\Lambda = 1/M_{f^*}$ ist, kann die Existenz von e^* , v^* und q^* unterhalb der Massenwerte 223, 114 und 188 GeV ausgeschlossen werden. Diese Grenzen sind wesentlich besser als die bisher bei HERA und auch bei LEP erreichten.

In der Elektron-Proton Streuung kann die Suche nach angeregten Neutrinos noch effektiver als in der Positron-Proton Streuung durchgeführt werden. Es wurde jedoch auch hier kein Anzeichen einer Erzeu-



Abbildung 13: Massenabhängige obere Grenzen (95% CL) für die Kopplung λ verschiedener Arten von Leptoquarks mit Fermionenzahl 2 aus der e^- p-Streuung bei HERA für a) skalare und b) vektorielle Leptoquarks. Zum Vergleich sind Grenzen gezeigt, die in der e^+ p-Streuung gewonnen wurden.

gung von v^* gefunden. Abbildung 12 zeigt die Grenzen für die Kopplungsstärke f/ Λ als Funktion der Masse des v^* . Gegenüber den in e⁺p-Streuung gewonnenen Grenzen zeigt sich hier besonders im Bereich hoher Werte von M_v^{*} eine um einen Faktor 10 erhöhte Sensitivität.

Eine bei HERA klassische Suche nach Physik jenseits des Standardmodells ist die Suche nach Leptoquarks. Auch hier erweitern e⁻p-Streudaten frühere Untersuchungen in der e⁺p-Streuung, da sie die Erzeugung von Leptoquarks mit der Fermionenzahl 2, aufgebaut aus einem Elektron und einem Valenzquark, ermöglichen. Ein solches Leptoquark würde sich in einer Resonanzüberhöhung in der invarianten Masse des Endzustandes aus Lepton und Hadronen zeigen. Die Nichtbeobachtung solch einer Resonanz erlaubt es, Grenzen



Abbildung 14: Massenabhängige obere Grenzen (95% CL) für die R-Parität verletzende Kopplung λ von Squarks (Ladung 2/3, erste bis dritte Generation j) unter Variation der SUSY-Modellparameter im angegebenen Parameterraum. Gezeigt sind die im Gesamtbereich und in Teilbereichen des Parameterraumes ausgeschlossenen Werte für λ .

für die Kopplungsstärke λ des Leptoquarks an Elektron und Quark als Funktion der Leptoquark-Masse zu bestimmen. In Abbildung 13 sind diese für verschiedene Arten von skalaren und vektoriellen Leptoquarks gezeigt. Für eine Kopplung von elektromagnetischer Stärke ($\lambda = 0.3$) lässt sich die Existenz von Leptoquarks unterhalb einer Masse von 275 bis 290 GeV ausschließen. Die Abbildung zeigt auch die trotz der geringeren Luminosität sehr viel größere Sensitivität der e⁻p Daten für Leptoquarks mit Fermionenzahl 2.

Eine weitere Veröffentlichung beinhaltet die Suche nach supersymmetrischen (SUSY) Teilchen, Partner der bekannten Bosonen und Fermionen, in resonanter Produktion durch Lepton-Quark Fusion. Hierbei wird zwangsläufig die Verletzung der SUSY-Quantenzahl R-Parität im Produktionsprozess verlangt. Es wurde nach supersymmetrischen Quarks (Squarks) in nahezu allen möglichen Zerfallskanälen gesucht. In keinem zeigte sich jedoch ein Überschuss relativ zur Erwartung des Standardmodells. Die Vielfalt der untersuchten Kanäle erlaubt es, den Raum möglicher Werte der die SUSY-Modelle charakterisierenden Parameter einzuschränken. Als Beispiel zeigt Abbildung 14 die Grenzen der Kopplungsstärke λ der Squarks der ersten bis dritten Generation als Funktion der Squarkmasse, berechnet im so genannten "Constrained MSS-Modell". Die Grenzen sind wenig abhängig von den speziellen Werten anderer freier Parameter des Modells. Bei breiten Variationen dieser Parameter können für eine Kopplung elektromagnetischer Stärke Massen der Squarks bis zu Werten von 270 GeV ausgeschlossen werden. Im Rahmen von Modellen (mSUGRA), die annehmen, dass die Massen von supersymmetrischen Teilchen mit ganz(halb)zahligem Spin bei höchsten Energien durch zwei fundamentale Massenparameter m_0 (m_{1/2}) bestimmt sind, ergeben die Messungen Grenzen der möglichen Werte dieser Parameter, wie in Abbildung 15 gezeigt ist. Diese Grenzen gehen über die am Tevatron in der pp-Streuung erhaltenen hinaus.



Abbildung 15: Ausschlussbereiche für die Massenparameter $m_{1/2}$ und m_0 im Rahmen des mSUGRA-Modells. Gezeigt ist der vom H1-Experiment für eine Kopplung λ elektromagnetischer Stärke ausgeschlossene Bereich (dunkle Fläche) verglichen mit der vom D0-Experiment am Tevatron erreichten Grenze.



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

ZEUS-Experiment

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

Sprecher: B. Foster, Univ. of Bristol

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

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

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

Neue Detektorkomponenten

Mikro-Vertex-Detektor

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

Im März wurde der komplett mit Strahlrohr montierte MVD kontinuierlich für drei Wochen im 24-Stunden-Betrieb ausgetestet, um so weit wie möglich alle System-Aspekte der Hard- und Software zu untersuchen. Zusätzlich wurden, getriggert mit einem stark segmentierten Szintillator-Teleskop, Daten mit Höhenstrahlung genommen. Die Analyse der Daten zeigte, dass 210 von 212 Modulen voll funktionsfähig waren. Das Signal/Rauschverhältnis von ungefähr 14:1 entsprach den Erwartungen. Die anschließende Spur-Rekonstruktion ergab bei Annahme der nominalen Position der Detektor-Module einen ersten Wert für die Ortsauflösung von etwa 70 µm. Werden die gemessenen, systematischen Versetzungen bei der Montage mit berücksichtigt, so ist nach einer Feinjustierung mit hochenergetischen Spuren eine Punktauflösung von besser als 20 µm zu erwarten. Am 30. März wurde der MVD erfolgreich in ZEUS eingebaut, im April wurde die Infrastruktur für die Elektronik und Kühlung in Betrieb genommen und im Mai und Juni erfolgte die endgültige Verkabelung. Test-Messungen und ein kurzer Cosmic-Run vor dem Anfahren von HERA zeigten, dass sich der MVD in ZEUS genauso verhielt wie im Systemtest. Rund um das Strahlrohr in der Vorwärtsund Rückwärtsrichtung wurden 1 cm² große Si-Dioden als Strahlungsmonitore installiert. Der Strahlungsmonitor misst sowohl die momentane als auch die integrierte deponierte Dosis und liefert im Falle von anhaltend hoher Dosisleistung ein Signal zum Auslösen des Lepton-Dumps. Schon mit einer vorläufigen Auslese-Elektronik war der Monitor ein unverzichtbares Werkzeug beim Steuern des Strahles durch die Wechselwirkungszone, um zu hohe Strahlenbelastungen beim Einfahren der Speicherringes zu vermeiden. Zusätzlich zu diesen Dioden werden Radfets und TLDs als Strahlungsmonitore benutzt.

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

Straw Tube Tracker

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

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

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

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

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

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

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

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



Abbildung 17: Szintillator-Blei Photondetektor des Luminositätsmonitors.

Luminositätsmonitor

Der Neubau des ZEUS Luminositätsmonitor-Systems wurde in diesem Jahr erfolgreich abgeschlossen. Es handelt sich dabei um drei Detektorkomponenten, einen Photondetektor (Abb. 17) und ein Elektron-Positron Paarspektrometer, die zum Nachweis von Photonen aus dem Bethe-Heitler Prozess ep \rightarrow ep γ dienen, und einen so genannten "6m Tagger" zum Nachweis gestreuter Elektronen. Der Photondetektor und das Spektrometer befinden sich im HERA-Tunnel, etwa 105 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt. Der Neubau des Photondetektors war erforderlich, da sich nach der Luminositätserhöhung von HERA sowohl die Rate von Bremsstrahlungs-Photonen als auch der Synchrotronstrahlungs-Untergrund beträchlich erhöhen, und der bisherige Photondetektor innerhalb kurzer Zeit durch Strahlenschäden beschädigt worden wäre. Das bisherige Photon-Kalorimeter wurde daher durch ein neues Kalorimeter (Szintillator-Blei Sandwich) mit strahlenfestem Szintillator ersetzt. Zur Reduzierung des Synchrotronstrahlungs-Untergrunds befindet sich unmittelbar vor dem Kalorimeter ein so genannter aktiver Filter aus Kohlenstoff mit vier Strahlungslängen Dicke. Der Filter ist in zwei Teile unterteilt, hinter denen sich jeweils ein Cherenkov-Detektor befindet. Die niederenergetischen Photonen der Synchrotronstrahlung werden in den Cherenkov-Detektoren nicht nachgewiesen. Der Energieverlust von Bethe-Heitler Photonen im Filter wird dagegen gemessen und zur Korrektur der Energiemessung verwendet.

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

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

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

Datenverarbeitung

ZEUS-Online Computing

Während der Umbau-Pause wurden wesentliche Bestandteile der zentralen Datenerfassungssysteme

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

ZEUS Offline-Computing

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

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



Abbildung 18: ZEUS-Farmen für Rekonstruktion und Analyse.

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

Physikalische Ergebnisse

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

Messung der Strukturfunktion F₂^{em} in tiefunelastischer Streuung

Die Quantenchromodynamik (QCD) ist die Theorie der starken Wechselwirkung, einer der vier fundamentalen Wechselwirkungen der Natur. Sie beschreibt die Wechselwirkungen von Quarks und Gluonen, aus denen das Proton besteht. Die Veränderung der Impulsverteilung der Partonen im Proton als Funktion von Q², dem Quadrat des Viererimpulsübertrages auf das gestreute Quark, lässt sich mit Mitteln der Störungstheorie innerhalb der Quantenchromodynamik vorhersagen. Bei HERA kann mit der Strukturfunktion F₂ die Impulsverteilung der Partonen mit Ereignissen der Photon-Quark-Streuung direkt gemessen werden. Diese Messung ist eine der wichtigsten bei HERA, da sie zum einen zur Kenntnis der Struktur des Protons bei den höchsten zugänglichen Energien führt, und zum anderen erlaubt, die Vorhersagen der Quantenchromodynamik in einem großen kinematischen Bereich zu testen. Es wurden differentielle Wirkungsquerschnitte für Reaktionen des neutralen Stromes als Funktion des Impulsanteiles x des getreuten Partons im Proton und als Funktion von Q^2 , der Virtualität des ausgetauschten Eichbosons, gemessen. Aus den gemessenen Wirkungsquerschnitten wurden alle Anteile vom Z⁰-Austausch herausgerechnet und die Strukturfunktion F^{em}₂ bestimmt, die die Partonverteilung im Proton für den Fall des reinen Photon-Austausches beschreibt.

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

Abbildung 19 zeigt F_2^{em} als Funktion von Q^2 bei verschiedenen Werten von x. Bei kleinen x-Werten steigt die Strukturfunktion steil an und zeigt eine deutliche Q²-Abhängigkeit, die auf eine zunehmende Zahl von Gluonen im Proton deutet. Die eingezeichnete Kurve ist eine von der ZEUS-Kollaboration durchgeführte globale Anpassung der Daten gemäß der störungstheoretischen QCD-Entwicklung nach dem DGLAP-Schema, in die neben den ZEUS-Daten auch Daten von einigen Experimenten bei niedrigerer Energie eingehen. Die gute Übereinstimmung der Anpassung mit den Datenpunkten zeigt, dass im gesamten Anwendungsbereich der Methode der Störungstheorie, der sich über vier Größenordnungen in x und über mehr als vier Größenordnungen in Q² erstreckt, die Protonstruktur von der Quantenchromodynamik beschrieben wird.

Ereignisse mit prompten Photonen

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



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



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

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

$$\langle k_{\rm T}^{\rm intr} \rangle = 1.69 \pm 0.18^{+0.18}_{-0.20} \, {\rm GeV}.$$

Dieser Wert liegt deutlich über den bisherigen Annahmen. Abbildung 20 zeigt eine Zusammenstellung von Messungen von verschiedenen Experimenten. Dargestellt sind die gefundenen Werte für $\langle k_T^{intr} \rangle$ als Funktion der Schwerpunktsenergie der Reaktion. Der Wert von ZEUS stimmt mit den anderen Daten und einem systematischen Anstieg von $\langle k_T^{intr} \rangle$ mit der Schwerpunktsenergie überein. Dies bedeutet, dass Anfangsund Endzustand der Reaktion nicht unabhängig voneinander sind, und dass das Proton von dem harten Prozess "weiß" und Gluonen abstrahlt. Dieses Ergebnis ist von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Gluonverteilung im Proton, da nur bei seiner Berücksichtigung die Messungen der Gluonverteilungen im Proton bei verschiedenen Energien übereinstimmen.

QCD Untersuchungen mit 2-Jet Ereignissen

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

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

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



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

tische QCD-Rechnungen zu testen, da ihre Häufigkeit direkt von der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung α_s abhängt. Durch eine QCD-Anpassung der relativen Häufigkeit von "2+1" Ereignissen als Funktion von Q² wurde $\alpha_s(Q)$ bestimmt. Abbildung 21 zeigt die Q-Abhängigkeit von α_s zusammen mit den QCD-Vorhersagen. Die vorhergesagte Q-Abhängigkeit ist in den ZEUS-Daten klar zu erkennen, und die gemessenen Werte stimmen innerhalb der Fehler mit den Vorhersagen überein. Für Q = M_Z ergibt sich

$$\begin{split} \alpha_{s}(M_{Z}) &= 0.1166 \\ &\pm 0.0019(\text{stat.})^{+0.0024}_{-0.0033}(\text{exp.})^{+0.0057}_{-0.0044}(\text{theor.}) \;. \end{split}$$

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

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

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

Messung des totalen Photoproduktions-Wirkungsquerschnitts

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



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

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

Die Positronen im Speicherring HERA sind bei Wechselwirkungen mit Protonen eine Quelle sowohl virtueller als auch reeller Photonen, die sich bei der Wechselwirkung auch wie Hadronen verhalten können. Mit einer Messung des totalen Wirkungsquerschnittes $\sigma_{tot}^{\gamma p}$ für quasi-reelle Photonen bei HERA kann man das Energieverhalten der totalen Wirkungsquerschnitte bei der höchsten experimentell zugänglichen Schwerpunktsenergie testen. Experimentell ist diese Messung sehr schwierig, da das gestreute Positron 35 m strahlabwärts gemessen werden muss, nachdem es im Strahlrohr durch mehrere Magnete des Beschleunigers abgelenkt worden ist. Die Genauigkeit der Messung hängt entscheidend von der genauen Vermessung des gestreuten Positrons ab. Dies erfordert eine genaue Kenntnis und Kontrolle der Maschinenparameter während der Messung. Deshalb wurde die Messung in speziellen Runs innerhalb weniger Stunden durchgeführt. Es konnte eine im Vergleich zu dem Ergebnis von 1992 deutlich verbesserte Messung mit geringeren systematischen Unsicherheiten durchgeführt werden. In Abbildung 22 ist der neue Wert des totalen Photoproduktions-Wirkungsquerschnittes $\sigma_{tot}^{\gamma p}$ bei einer yp-Schwerpunktsenergie von 209 GeV dargestellt, zusammen mit Messungen hadronischer Wirkungsquerschnitte bei niedrigeren Energien und dem Ergebnis des H1-Experiments bei der gleichen Energie. Die eingezeichneten Kurven sind Anpassungen von ZEUS bzw. Donnachie und Landshoff, die auf den Vorhersagen der Regge-Theorie beruhen. Die Anpassungen beschreiben die Energieabhängigkeit der Wirkungsquerschnitte bis zu den höchsten Energien. Die Messung zeigt, dass sich die reellen Photonen wie Hadronen verhalten, und unterstützt die Vorstellung einer universellen Energieabhängigkeit aller hadronischen Wirkungsquerschnitte.

Eigenschaften diffraktiver Ereignisse

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

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



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

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

Die Topologie des Zustands wird charakterisiert durch Messgrößen, die die Spherizität (S) und die Jetartigkeit (Thrust T) der Ereignisse charakterisieren. Für isotrope Endzustände ist T = 0.5 und S = 1.0, und für kollimierte 2-Jet-Endzustände ist T = 1.0 und S = 0.0. Abbildung 23 zeigt die mittleren Thrust- und Spherizitätswerte für diffraktive Ereignisse als Funktion der Masse M_x . Sie sind verglichen mit entsprechenden e^+e^- -Ereignissen und einigen Modellrechnungen. Ergebnisse der H1-Kollaboration sind ebenfalls gezeigt. Man sieht, dass mit steigendem M_x der mittlere Thrust anwächst und die Spherizität abfällt. Die Ereignisse ähneln immer mehr kollimierten 2-Jet-Zuständen. Dieser Trend stimmt mit den e^+e^- -Daten überein und ist damit ein klares Indiz dafür, dass die Hadronisierung der Partonen nicht vom Mechanismus ihrer Erzeugung abhängt.

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



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

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

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

Suche nach neuen Teilchen und Effekten

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



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

mentaren Fermionen (e*, q*, v*) gesucht. Solche Anregungszustände elementarer Fermionen erwartet man, wenn diese Fermionen aus weiteren Bausteinen zusammengesetzt sind. Sie zerfallen in den Grundzustand des Fermions und Photonen, Quarks, W- oder Z-Bosonen und Neutrinos. Gesucht wurde nach den verschiedenen Zerfallsprodukten im Endzustand. Alle Endzustände haben charakteristische Signaturen, wie zum Beispiel bestimmte invariante Massen von Teilchenkombinationen oder große fehlende Transversalimpulse. Mit Simulationen wurden die Akzeptanzen des ZEUS-Detektors für diese Endzustände berechnet und unter gewissen Modellannahmen Vorhersagen für zu beobachtende Ereigniszahlen gemacht. Es sind keine Signale beobachtet worden. Daraus ergeben sich obere Grenzen für die Produktion angeregter Zustände, die durch Grenzen der jeweiligen Kopplungsstärken f/Λ als Funktion der Masse des angeregten Fermions ausgedrückt werden können. Als Beispiel zeigt Abbildung 25 Grenzen für diese Kopplungsstärken. Durch die hohe Schwerpunktsenergie bei HERA können angeregte Fermionen mit größeren Massen ausgeschlossen werden als bei LEP.

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



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

ton (Elektron/Positron) seine Generation im Endzustand ändert, wie $ep \rightarrow \mu X$ oder $ep \rightarrow \tau X$ mit anschließendem Zerfall des τ -Leptons. Modelle mit R-paritätsverletzender Supersymmetrie sowie Theorien mit Leptoquarks sagen derartige Prozesse vorher. Leptoquarks sind Teilchen, die sowohl leptonische wie hadronische Quantenzahlen tragen. Es wurden keine derartigen Ereignisse gefunden und Grenzen für die Produktionswahrscheinlichkeit von Leptoquarks berechnet. Abbildung 26 zeigt als Beispiel die Grenzen für das Produkt aus Produktionswirkungsquerschnitt für Leptoquarks und dem Verzweigungsverhältnis des Leptoquarks für den anschließenden Zerfall. Einige dieser Grenzen, insbesondere für $e \rightarrow \tau$, sind die derzeit strengsten.



Abbildung 27: Blick auf das HERMES-Experiment mit dem Elektronikwagen im Hintergrund. In der linken Bildhälfte sind das Positronen-Strahlrohr und das polarisierte Target zu sehen. Neben dem Magneten in der Mitte des Experiments erkennt man in der rechten Bildhälfte den RICH und das Kalorimeter.

HERMES-Experiment

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

Sprecher: D. Ryckbosch, Univ. Gent

Die HERMES-Kollaboration nutzte die betriebsbedingte Umbauphase des HERA-Speicherringes im Jahr 2001, um ein tieferes Verständnis der polarisierten Protondaten zu erreichen und erste Analysen der neuen Daten am polarisierten Deuteriumtarget sowie an schweren unpolarisierten Gastargets durchzuführen. Des Weiteren konzentrierte sich die Kollaboration auf die notwendigen technischen Vorbereitungen des Physikprogramms der zweiten Betriebsphase von HERA (HERA II). Im Vergleich zum HERMES Physikprogramm der ersten Betriebsphase von HERA, das im Wesentlichen der Messung der Verteilungsfunktionen longitudinal polarisierter Up-, Down- and See-Quarksim longitudinal polarisierten Nukleon (Neutron, Proton, Deuteron) gewidmet war, ist in den nächsten Jahren der Schwerpunkt des HERMES-Experimentes die Messung der Verteilungsfunktion transversal polarisierter Up-Quarks. Dazu wurde ein transversal polarisiertes Wasserstofftarget gebaut.

Im Jahr 2001 wurde das HERMES-Spektrometer weiter verbessert, unter anderem wurde das System der Datenerfassung modernisiert. Im nächsten Jahr soll ein bereits fertig gestellter, radförmiger Siliziumdetektor, das so genannte "Lambda-Wheel", in der Targetregion eingebaut werden. Um Detektorkomponenten zu schützen, wurde ein Strahlverlustmonitor neu konstruiert, eingebaut und erfolgreich getestet. Die absolute Kalibration wird ein genaues Monitoren drohender Strahlverluste und eine kontrollierte, präventive Ablenkung des Positronenstrahls ermöglichen. Damit ist HERMES bereit zur Datennahme (Abb. 27).

Ein wesentliches neues Forschungsfeld für das HERMES-Experiment hat sich mit dem Studium exklusiver Prozesse aufgetan, die für den Fall der Produktion eines reellen Photons oder eines Pions im Rahmen verallgemeinerter Parton-Verteilungsfunktionen (GPDs) theoretisch modelliert werden können. Erste Resultate, basierend auf der überragenden Statistik des Jahres 2000 für das longitudinal polarisierte Deuteriumtarget, wurden unter anderem für das verallgemeinerte Gerasimov-Drell-Hearn (GDH) Integral erhalten. Diese Untersuchungen stellen einen der vielseitigen Beiträge der HERMES-Kollaboration zum besseren Verständnis der Spinstruktur des Nukleons dar.

Neue Detektorkomponenten

Das transversal polarisierte Wasserstofftarget

Kernstück des HERMES-Targets ist eine Speicherzelle (21 mm×9.8 mm×400 mm) innerhalb des HERA-Positron-Speicherringes, die die Dichte polarisierter



Abbildung 28: Der neue transversale Magnet für das HERMES-Target.

Wasserstoff- und Deuteriumatome bis zu 15-fach erhöht im Vergleich zu einem freien Atomstrahl. Eine auf dem Stern-Gerlach Prinzip basierende Atomstrahlquelle (ABS) injiziert die polarisierten Atome seitlich in die Speicherzelle. Der Anteil von Atomen im Vergleich zu Molekülen in der Speicherzelle wird mit Hilfe eines Massenspektrometers (TGA) aus einem Probestrahl aus dem Zentrum der Zelle bestimmt. Aus dem gleichen Probestrahl wird auch die Polarisation der Atome mit einem Breit-Rabi Polarimeter (BRP) bestimmt.

Das Target wurde in den Datennahmeperioden 1996 bis 1997 mit longitudinal polarisiertem Wasserstoff und 1998 bis 2000 mit longitudinal polarisiertem Deuterium betrieben. Während der Betriebsunterbrechung im Jahr 2001 wurde das Target so umgebaut, dass es nun mit transversal zur Impulsrichtung des einfallenden Positronenstrahls polarisiertem Wasserstoff betrieben werden kann. Dafür musste ein konventioneller Dipolmagnet mit einem Feld von 300 mT konstruiert werden, dessen Magnetfeld über den Bereich der Speicherzelle eine gute Homogenität aufweist (Abb. 28). Die Bedingungen an die Feldstärke wurden einerseits gegeben durch die maximal tolerierbare Rate an Synchrotronstrahlung (B < 400 mT) und andererseits durch die Notwendigkeit, den Elektronen- und Nukleonenspin so weit zu entkoppeln, dass Depolarisationseffekte, wie Rekombination an der Zellenwand und Spinaustauschstöße, möglichst unterdrückt werden (B > 250 mT).


Abbildung 29: Die HERMES-Targetzelle mit den zusätzlichen Korrekturspulen.

Nach sorgfältiger Abstimmung der Hochfrequenzübergänge der ABS und des BRP konnte eine Polarisation in den beiden Spinzuständen P_{z+}^{BRP} und P_{z-}^{BRP} für Wasserstoffatome von 86% gemessen werden. Diese Werte stimmen mit Berechnungen, welche auf Messungen von $P_{z+/-}^{BRP} = 92\%$ von 1997 basieren, gut überein. Dabei wurde zum Beispiel berücksichtigt, dass während der Datennahme in 1997 eine größere Targetzelle (29 mm × 9.8 mm) verwendet wurde, wodurch Rekombination an der Zellenwand und Spinaustauschstöße unterdrückt waren.

Spinaustauschstöße und Rekombination an der Zellenwand sind nicht die einzigen Möglichkeiten, Atome in der Targetzelle zu depolarisieren. Das RF-Feld des HERA-Positronenstrahls kann ebenfalls Übergänge zwischen einzelnen Hyperfeinzuständen anregen. Dabei erzeugt der Elektronenstrahl beim Durchqueren der Targetzelle für die Atome ein RF-Feld, dessen Frequenzspektrum der Fourier-Transformierten der Bunch-Struktur des Strahls entspricht. Diese strahlinduzierten Kern-Depolarisationen wurden während der Datennahme 1996/1997 mit dem longitudinal polarisierten Wasserstofftarget im Detail studiert.

Um diese Effekte zu unterdrücken, wurde der Magnet für das longitudinal polarisierte Target bezüglich Feldstärke und Homogenität so konstruiert, dass keine Kernresonanzen innerhalb der Targetzelle auftreten können. Dafür war eine relative Feldhomogenität von $\Delta B/B < 1.5\%$ ausreichend. Für das transversal polarisierte Target gibt es zusätzliche Kernübergänge, was zur Folge hat, dass bei der geplanten Feldstärke von 300 mT alle 0.39 mT eine Resonanz auftreten kann.

Um das Auftreten von Resonanzen zu unterdrücken, muss eine Feldhomogenität von 0.14 mT erreicht werden. Die Verwendung von präzise gefertigten Beilageblechen an den Magnetpolenden ermöglichte es, eine Feldhomogenität von 0.6 mT zu erreichen. Um die Homogenität des Feldes weiter zu verbessern, wurden Korrekturspulen entworfen, die direkt auf der Speicherzelle montiert sind (Abb. 29). Messungen in einem Testaufbau ergaben, dass weder mechanische noch thermische Belastung der Speicherzelle ein Problem darstellen und das System fertig für den Einbau in den HERMES-Detektor ist.

Der Strahlverlustmonitor

Während der letzten Jahre wurde von der HERMES-Kollaboration ein radförmiger, aus 12 Modulen bestehender Siliziumdetektor, das so genannte "Lambda Wheel", entwickelt, welcher unmittelbar an die Speicherzelle anschließend im Vakuum des HERA-Positronstrahlrohres installiert ist.

Die Konstruktion dieses Detektors – zu großen Teilen durch NIKHEF in Amsterdam – ist seit Beginn des Jahres 2001 abgeschlossen. Im Frühjahr 2001 konnte eine Testinstallation des kompletten Detektors im HERMES-Experiment erfolgreich durchgeführt werden (Abb. 30).

Während der Testphase eines Modul-Prototyps im Jahr 2000 zeigte sich, dass nicht unerhebliche Schädigungen des Siliziumdetektors durch erhöhte Strahlungsbelastungen bei unkontrollierten Strahlverlusten verursacht werden können. Um solche Schäden an den strahlungsempfindlichen Komponenten des HERMES-Experiments in Zukunft zu minimieren, wurde ein Strahlverlustmonitor ("Beam Loss Monitor" BLM) neu konstruiert. Ein solcher Monitor soll die bei instabilen Strahlbedingungen in der Nähe des Experiments auftretende erhöhte Strahlung messen, welche



Abbildung 30: Der neue radförmige Siliziumdetektor.

auf einen drohenden unkontrollierten Strahlverlust hinweisen kann.

Das Auslösen eines schnellen HERA-Ablenkmagneten durch den BLM ermöglicht dann die kontrollierte, präventive Ablenkung des Positronenstrahls aus seiner Umlaufbahn. Die Anforderungen an ein solches Frühwarnsystem sind ein einfacher, stabiler und zuverlässiger Betrieb sowie eine kurze Reaktionszeit. Aus diesem Grund wurden Ionisationskammern als Monitore gewählt.

Der entsprechend diesen Anforderungen am NIKHEF entwickelte BLM (Abb. 31) besteht aus zwei baugleichen, links und rechts vom Strahlrohr montierten Sätzen von je drei aktiven Ionisationskammern und einem Referenzdetektor. Letzterer ist elektronisch zwar identisch geschaltet, jedoch nicht mit aktivem Gasvolumen ausgestattet, und dient zur Unterdrückung elektronischer Störungen. Detektieren mindestens zwei der drei Ionisationskammern eine Strahlungsdosis, die eine festgelegte Schwelle für eine gewisse Zeitspanne überschreitet, und misst gleichzeitig der Referenzdetektor kein Signal, wird ein Trigger erzeugt.

Der BLM wurde im Frühjahr 2001 an einer Röntgenstrahlungsquelle der Universität Mons-Hainaut in



Abbildung 31: Schematische Darstellung einer Hälfte des BLM.

Belgien kalibriert und ermöglicht so, dem gemessenen elektronischen Signal die entsprechende im Monitor akkumulierte absolute Strahlungsdosis zuzuordnen. Die Installation im Experiment erfolgte im Sommer 2001. Seit Oktober wird der BLM testweise betrieben. Während dieser Testphase wurden verschiedene Signal-Charakteristika beobachtet, welche eine Einteilung der gemessenen Strahlverluste gemäß ihrer Zeitstruktur gestatten:

- Sehr schnelle Strahlverluste ereignen sich innerhalb so kurzer Zeitspannen – ungefähr innerhalb eines Strahlumlaufs, dass sie vom System nicht vermieden werden können. Die deponierten Strahlungsdosen sind jedoch im allgemeinen gering, außer direkt an der Stelle, an welcher der tatsächliche Strahlverlust auftritt.
- Schnelle Strahlverluste ereignen sich innerhalb einiger Umläufe. Sie können von einem schnellen BLM-Trigger früh genug erkannt werden, so dass ein kontrolliertes Ablenken des Strahls die Deposition einer größeren Strahlungsmenge im Detektor vermeidet.
- Langsame Strahlverluste dauern von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten. In diesem Fall kann bereits ein langsamer BLM-Trigger die Strahlungsbelastung deutlich reduzieren (Abb. 32).

Nach Beendigung der Testphase wird dieser Trigger über ein etwa 4km langes Lichtleiterkabel mit der Steuerelektronik des Ablenkmagneten, welcher sich in der Nähe der HERA-Halle West befindet, verbunden werden.



Abbildung 32: Das obere Bild zeigt die gemessene Strahlungsdosis über die maximale Auslesezeit von 100 ms. Das zu sehende periodische (50 Hz) Signal hielt über Minuten an. Im unteren Bild ist eine Ausschnittsvergrößerung um einen Faktor 1000 zu sehen. Da in diesem Fall nur die ersten Bunche gefüllt sind, kann man sehr gut die 47.317 kHz Umlauffrequenz von HERA sehen.

Physikalische Ergebnisse

Die Verteilungsfunktionen transversal polarisierter Quarks

Die innere Struktur von Proton und Neutron wird in führender Ordnung durch zwei Gluonverteilungsfunktionen, G und Δ G, und durch drei Quarkverteilungsfunktionen, q, Δq und δq , beschrieben. Die Impulsdichteverteilung der Quarks q wurde mit hoher Präzision über Jahrzehnte experimentell bestimmt. Ebenso wurden die Impulsdichteverteilung der Gluonen G sowie die Verteilungsfunktionen longitudinal polarisierter Quarks Δq während der vergangenen 10 Jahre mit guter Genauigkeit gemessen. Im Gegensatz dazu ist von der Gluon-Spindichteverteilung ΔG bisher ausschließlich das Vorzeichen bekannt. Die Verteilungsfunktion δq die so genannte "transversity distribution" oder Verteilungsfunktion transversal polarisierter Quarks, ist bis heute experimentell vollständig unbekannt.

Alle Ouarks besitzen eine Ouanteneigenschaft, die als Chiralität bezeichnet wird. Chiralität leitet sich vom griechischen Wort "chir" für "Hand" ab und bezeichnet die Händigkeit der Quarks. Quarks können links- oder rechtshändig ausgerichtet sein, wobei in allen Prozessen, welche durch die elektroschwache oder die starke Wechselwirkung vermittelt werden, die Chiralität erhalten bleibt. Die besondere Eigenschaft der δq -Verteilung besteht in ihrer ungeraden chiralen Struktur. Dagegen besitzen alle anderen zuvor beschriebenen Verteilungsfunktionen (Abb. 33) eine gerade chirale Struktur. So wird bei der Bestimmung der Impulsdichteverteilung q über alle rechts- und linkshändigen Quarks summiert, während die Helizitätsverteilung Δq gerade die Differenz zwischen der Anzahl links- und rechtshändiger Quarks im longitudinal polarisierten Proton misst. Die



Abbildung 33: Schematische Illustration der Quark-Verteilungsfunktionen, die die Struktur des Protons beschreiben. Die großen schwarzen Kreise und Pfeile repräsentieren das Nukleon und dessen Spin. Die kleinen roten Kreise mit ihren Pfeilen stehen für ein Quark und dessen Spinrichtung.

"transversity distribution" δq dagegen koppelt linksund rechtshändige Quarks in einem Streuprozess, das heißt die Chiralität des Quarks wird im Streuprozess geändert: es findet eine Helizitätsumkehr statt.

Die großen Schwierigkeiten in der Messung der "transversity distribution" δq sind gerade durch den Prozess der Helizitätsumkehr während der Streuung am Quark bedingt.

Die Collins-Fragmentationsfunktion

Um die Gesamtchiralität des Streuprozesses zu bewahren, muss eine weitere, chiral-ungerade Funktion am Streuprozess beteiligt sein. Eine solche chiral-ungerade Funktion wurde erstmals 1993 von Collins vorgeschlagen. Die Collins-Fragmentationsfunktion beschreibt die Fragmentation von transversal polarisierten Quarks in unpolarisierte Hadronen. Sie koppelt im Streuprozess Quarks entgegengesetzter Chiralität derart, dass die Chiralität des Gesamtprozesses erhalten bleibt. Die Signatur eines Streuprozesses mit Beteiligung der Collins-Fragmentationsfunktion besteht in einer experimentell beobachtbaren Targetspin-Asymmetrie, die vom azimutalen Winkel ϕ des erzeugten Hadrons ab-versalvektor der Targetpolarisation und dem Transversalimpuls des Hadrons bezüglich der Richtung des ausgetauschten virtuellen Photons.

Der Streuprozess zur direkten Messung der "transversity distribution" δq ist die semi-inklusive Streuung von Elektronen (oder Positronen) an einem transversal polarisierten Nukleontarget, wobei die chiral-ungerade Collins-Fragmentationsfunktion mit der chiral-ungeraden Helizitätsverteilung koppelt.

Erste Messung am longitudinal polarisierten Target

Das HERMES-Experiment hat die azimutale Verteilung von Pionen aus der Streuung von unpolarisierten Positronen an longitudinal polarisierten Protonen gemessen. Der azimutale Winkel ϕ ist, wie in Abbildung 34 veranschaulicht, der Winkel zwischen der Streuebene und der Ebene der Hadronerzeugung, bezogen auf die Richtung des virtuellen Photons.



Abbildung 34: Schematische Darstellung des Streuprozesses: Das einlaufende Positron (gekennzeichnet durch den Vektor k), das gestreute Positron (k') und das virtuelle Photon (q) liegen in einer Ebene, der Streuebene. Das Pion wird in einer weiteren Ebene erzeugt, die den Winkel ϕ mit der Streuebene um den q-Vektor bildet. Das Vektordiagramm links oben zeigt die Zerlegung des Target-Polarisationsvektors in eine Transversal- und eine Longitudinalkomponente bezüglich der Richtung des virtuellen Photons.

Das Protontarget ist bezüglich der Richtung des einlaufenden Positrons longitudinal polarisiert. Da das virtuelle Photon um den Winkel θ_{γ} von der Richtung des einlaufenden Positrons abweicht, gibt es aus Sicht des virtuellen Photons neben der vorherrschenden longitudinalen Targetkomponente S_L auch eine transversale Targetkomponente S_T, bezüglich derer der so genannte Collins-Winkel definiert werden kann.

Eine chiral-ungerade Fragmentationsfunktion, die an die gesuchte chiral-ungerade "transversity distribution" δq koppelt, führt in Abhängigkeit von der Polarisation des Targets zu einer Abhängigkeit der azimutalen Verteilung der Pionen im Winkel ϕ . Für diese Messung wird die folgende "Einfach-Spin Asymmetrie" für einen unpolarisierten Strahl und ein longitudinal polarisiertes Target gebildet:

$$A(\phi) = \frac{1}{\langle P \rangle} \frac{N^+(\phi) - N^-(\phi)}{N^+(\phi) + N^-(\phi)} \,.$$

 N^+ und N^- bezeichnen die Anzahl der Pionen für die jeweils entgegengesetzte Ausrichtung des Targetspins und $\langle P \rangle$ ist der mittlere Wert der Targetpolarisation.



Abbildung 35: HERMES Messungen der azimutalen Asymmetrie $A(\phi)$ für neutrale und geladene Pionen. Die Kurven zeigen die Beschreibung der Messungen durch eine einfache Sinusfunktion.

Ist die Verteilung der Pionen bezüglich des azimutalen Winkels ϕ unabhängig von der Orientierung des Targetspins, so ist auch die Asymmetrie A(ϕ) gleich Null. Die in Abbildung 35 gezeigten azimutalen Asymmetrien zeigen dagegen für neutrale (π^0) und für positiv geladene Pionen (π^+) eine deutliche Abhängigkeit der Verteilung in ϕ von der Richtung der Targetpolarisation. Diese Abhängigkeit kann durch eine einfache Sinusfunktion beschrieben werden. Die Beobachtung einer mit Null übereinstimmenden Asymmetrie für negativ geladene Pionen (π^-) entspricht den Erwartungen aufgrund der unterschiedlichen Quarkzusammensetzung von π^- und π^+ bzw. π^0 .

Das besondere Interesse an dieser Messung besteht allerdings gerade in der Beobachtung einer von Null verschiedenen Asymmetrie für π^+ und π^0 . Diese gibt den ersten experimentellen Nachweis dafür, dass die Collins-Fragmentationsfunktion existiert und die "transversity distribution" δq von Null verschieden ist.

Zukünftige Messung am transversal polarisierten Target

Im kommenden Jahr wird HERMES mit einem transversal polarisierten Wasserstofftarget Daten nehmen. Die oben genannten Ergebnisse für ein longitudinal polarisiertes Target haben gezeigt, dass die chiralungerade Collins-Fragmentationsfunktion groß genug ist, um die bisher unbekannte Quarkverteilung δq messen zu können Die Collins-Fragmentationsfunktion wirkt hier durch ihre chiral-ungerade Natur wie ein "Filter" für die Verteilung δq . Das Charakteristische an dieser Fragmentationsfunktion ist, dass sie eine Targetspin-Asymmetry erzeugt, die vom azimutalen Winkel abhängt.

Es gibt aber auch noch andere "Filter", das heißt chiralungerade Prozesse, mit denen man die Quarkverteilung δq messen kann. Die Fragmentation eines transversal polarisierten Quarks in ein polarisiertes Λ -Hyperon oder in ein polarisiertes ρ -Meson sind Beispiele, wie man durch Messung der Polarisation von Hadronen aus der Streuung an einem transversal polarisierten Target Aufschluss über die Quarkverteilung δq erhält. Untersucht man im Fall der Collins-Fragmentation die Winkelverteilung eines Hadrons, so kann man weiterhin die Produktion zweier Hadronen (Pionen) studieren und hier insbesondere die Korrelation beider Winkelverteilungen, und dadurch Aufschluss über die Quarkverteilung δq , erhalten.

Alle diese Beispiele zeigen, dass es verschiedene und voneinander unabhängige Methoden gibt, δq zu messen.

Inzwischen existiert eine Vielzahl theoretischer Modelle und Vorhersagen, die nun experimentell überprüft werden können. Hier wird das HERMES-Experiment eine Vorreiterrolle übernehmen, indem es in den nächsten Jahren Daten an einem transversal polarisierten Target nimmt. Nur so sind die erwarteten Effekte groß genug, um eine signifikante Bestimmung der eingehenden Größen und deren Interpretation zu gewährleisten. So ist nicht nur δq bisher experimentell unbekannt, auch für die verschiedenen Fragmentationsfunktionen gibt es zur Zeit, wenn überhaupt, nur Abschätzungen. Da HERMES zuerst ein transversal polarisiertes Wasserstofftarget (also Protonen) verwenden wird, welches, vereinfacht gesehen, aus zwei u-Quarks und einem d-Quark besteht, werden die Messungen vorrangig die Größe δu und die Collins-Fragmentationsfunktion H_1^{\perp} bestimmen. Später können auch Daten an einem transversal polarisierten Deuteriumtarget genommen werden. In Verbindung mit der Messung an Wasserstoff wird dies die Bestimmung von δd ermöglichen.

Tief virtuelle Compton-Streuung

Beim HERMES-Experiment wurden Messungen der exklusiven Produktion reeller Photonen durch die so genannte tief virtuelle Compton-Streuung ("Deeply Virtual Compton Scattering" DVCS) durchgeführt. Zusammen mit der Messung der exklusiven Produktion von Mesonen eröffnet diese Studie einen tieferen Blick in die Struktur des Protons. Die Beschreibung derartiger Prozesse beruht auf so genannten "generalisierten Partonverteilungen" (GPD), welche Verallgemeinerungen der Partonverteilungen sind, die in inklusiven tiefunelastischen Streuexperimenten gemessen werden. Die GPDs enthalten zusätzlich zur Beschreibung der Quarkstruktur des Nukleons auch noch Informationen über Wechselwirkungen und Korrelationen der Quarks und Gluonen untereinander, sowie über ihre Bahndrehimpulse.

Für jede Quarksorte wie für die Gluonen gibt es mehrere polarisierte und unpolarisierte GPDs. Bei DVCS-Ereignissen spielen beide Sorten eine Rolle, während bei der exklusiven Produktion von pseudoskalaren und Vektor Mesonen nur die polarisierten bzw. die unpolarisierten GPDs beitragen. Diese Besonderheit ermöglicht es, zumindest teilweise die verschiedenen Arten von GPDs für verschiedene Quarksorten zu unterscheiden. Dabei hat die Messung des DVCS-Prozesses den Vorteil, dass die Erzeugung eines Photons in der Streuung eines Positrons an einem Parton in nur einem Schritt vor sich geht, wohingegen die Erzeugung eines Mesons einen zweiten Schritt, nämlich die Formierung eines Quark-Antiquark-Paares erfordert. Zur Interpretation der Daten wird in diesem Fall eine zusätzliche Annahme über die Verteilung der Quarks im Meson benötigt.



Abbildung 36: Die Positronen-Spin-Asymmetrie A_{LU} für die exklusive Elektroproduktion reeller Photonen als Funktion des azimutalen Winkels ϕ (Daten von 1996 und 1997). Die gestrichelte Kurve ist eine an die Daten genäherte Sinus-Funktion mit einer Amplitude von 0.23, die durchgezogene Kurve ist das Ergebnis einer Modellrechnung, die auf GPDs basiert. Das gelbe Band repräsentiert den systematischen Fehler der Messergebnisse.

Experimentell ist jedoch die Bestimmung der Flugrichtung und der Energie des erzeugten Photons im DVCS-Prozess weniger genau möglich als die der erzeugten Mesonen. Dadurch wird es schwieriger, zu bestimmen, ob ein gemessenes Photoproduktionsereignis tatsächlich einem exklusiven DVCS-Ereignis entspricht, oder ob noch weitere, nicht nachgewiesene Teilchen entstanden sind. Aus diesem Grund werden in der Datenanalyse mittels des Energie-Impulserhaltungssatzes Gesamtenergie und -impuls der nicht gemessenen Teilchen rekonstruiert, und es wird verlangt, dass die so rekonstruierte fehlende Masse der des Targetprotons entspricht

Eine weitere Besonderheit des DVCS-Prozesses ist die Ununterscheidbarkeit der in ihm produzierten Photonen von Bremsstrahlungs-Photonen, welche von den Strahlpositronen bei der Wechselwirkung abgestrahlt werden (Bethe-Heitler-Prozess). Dieser Prozess dominiert unter den experimentellen Bedingungen im HERMES-Experiment deutlich gegenüber dem DVCS-Prozess.



Abbildung 37: Die Strahlspin Analysierstärke $A_{LU}^{\sin\phi}$ als Funktion der fehlenden Masse (Daten von 1996 und 1997). Systematische Unsicherheiten sind in dem Fehlerband dargestellt.

Die Datenanalyse profitiert jedoch davon, dass die beiden Prozesse zum selben ununterscheidbaren Endzustand führen und damit quantenmechanisch interferieren.

Im Falle eines polarisierten Positronenstrahls bedingt dies eine Asymmetrie in der Verteilung im azimutalen Winkel ϕ zwischen der Richtung des bei dem Streuprozess ausgetauschten virtuellen Photons und der des beobachteten reellen Photons, relativ zur Streuebene des Positrons. Die ϕ -Verteilung einer solchen Asymmetrie ist in Abbildung 36 dargestellt. Im Vergleich sind die Anpassung einer Sinusfunktion sowie eine auf GPDs beruhende Modellrechnung dargestellt, die Vorzeichen und Größe der gemessenen Asymmetrie gut beschreiben.

Für die gemessenen Ereignisse wurde das Sinus-Moment (analog der Amplitude der Sinus-Kurve) der Strahlspin-Asymmetrie als Funktion der fehlenden Masse untersucht. In Abbildung 37 ist zu sehen, dass im Bereich bis etwa 2 GeV die Asymmetrie mit einem Wert von etwa -0.25 maximal ist, und im Fragmentationsbereich ($M_x > 3$ GeV) mit Null übereinstimmt. Inzwischen wurde die Analyse der Strahlspin-Asymmetrie auf die Protondaten ausgedehnt, die im Jahr 2000 genommen worden sind. In einem weiteren Schritt werden sie mit den Daten aus dem Jahre 1998 kombiniert, welche mit einem polarisierten Elektronenstrahl gemessen wurden. Die erwarteten Asymmetrien zwischen den Ergebnissen mit verschiedenen Vorzeichen der Strahlladung erlauben den Zugriff auf weitere GPDs. Die Analyse wird des Weiteren auf Daten mit einem Deuteriumtarget ausgedehnt, um Unterschiede zwischen DVCS am Proton und am Deuteron zu untersuchen, die den Zugang zu den GPDs vom Deuteron erlauben.

Die verallgemeinerte Gerasimov-Drell-Hearn Summenregel

Im Jahr 2000 konnte die HERMES-Kollaboration erfolgreich ihre Datennahme mit einem polarisierten Deuteriumtarget beenden. Damit steht ein großer Datensatz spinpolarisierter Daten für die spinabhängige tiefunelastische Streuung sowohl am Proton als auch am Deuteron zur Verfügung. Durch Vergleich der am Deuteron und Wasserstoff gewonnen Daten lassen sich die Beiträge des Neutrons extrahieren.

Der Schwerpunkt der Analyse inklusiver Streuereignisse wird am HERMES-Experiment durch die Bestimmung der Spinstrukturfunktionen g_1 für das Proton, das Deuteron und das Neutron gebildet. Einen anderen Blickwinkel auf die durch diese Spinstrukturfunktionen beschriebene Physik bietet das Studium des verallgemeinerten Gerasimov-Drell-Hearn (GDH) Integrals an Proton und Neutron.

Dieses Integral geht für große Photon-Virtualitäten in die ersten Momente der Spinstrukturfunktionen über. Diese stehen daher in enger Verbindung zum "Spinrätsel" des Nukleons. In Erweiterung dieser ersten Momente hin zu kleineren Photon-Virtualitäten gewinnt man im Grenzwert reeller Photonen die so genannte GDH-Summenregel, die aus wenigen theoretischen Prinzipien ableitbar ist und eine Relation zum anomalen magnetischen Moment des Nukleons herstellt.

Diese wurde schon im Jahre 1965 unter Verwendung grundlegendster physikalischer Prinzipien für die Absorption reeller, zirkular polarisierter Photonen an longitudinal polarisierten Nukleonen abgeleitet. Ihre experimentelle Überprüfung erforderte dagegen technologische Entwicklungen, die erst in den letzten Jahren gelangen. Erste Experimente haben kürzlich ihre Ergebnisse veröffentlicht und scheinen die Gültigkeit der GDH-Summenregel für reelle Photonen zu bestätigen.

Wie bereits erwähnt, wurde im Kontext des Spinrätsels erkannt, dass die GDH-Summenregel den Grenzfall für reelle Photonen eines Integrals über die Spinstrukturfunktion für virtuelle Photonen darstellt. Die Verallgemeinerung der GDH-Summenregel vom Falle reeller Photonen zu einem Integral über den Photoabsorptions-Wirkungsquerschnitt polarisierter virtueller Photonen an longitudinal polarisierten Nukleonen stellt somit eine Messgröße dar, die geeignet ist, den Übergang von der spinabhängigen tiefunelastischen Streuung zur spinabhängigen Photoabsorption reeller Photonen zu studieren.

Messung der Q²-Abhängigkeit

Das HERMES-Experiment ist in der Lage, diese Größe über einen großen Energiebereich und einen weiten Bereich von Photon-Virtualitäten zu vermessen. Dabei werden zugleich der Übergang zwischen verschiedenen Beschreibungsweisen des Nukleons und ein weiter Bereich physikalischer Phänomene untersucht, die zur spinabhängigen Photoabsorption beitragen. So ist zum Beispiel für kleine Photon-Virtualitäten und Anregungsenergien eine Beschreibung in Form von Anregungen des Nukleons erfolgreich, während bei hohen Energien und Photon-Virtualitäten das Quark-Parton Modell die geeignete Beschreibungsform darstellt. Die Vermessung des verallgemeinerten GDH-Integrals über einen weiten Bereich von Photon-Virtualitäten ermöglicht somit das Studium des Übergangs zwischen verschiedenen Beschreibungsformen, und möglicherweise auch einen Blick auf Korrelationen ("higher twist") zwischen den Partonen der Nukleonen, welche beim Übergang zwischen der Streuung an einzelnen Partonen bei hoher Photon-Virtualität zu kollektiven Phänomenen, wie der Anregung von Nukleon-Resonanzen, zu Tage treten sollten.

Die von HERMES gewonnenen Daten zeigen jedoch, dass der Beitrag von Nukleon-Resonanzen zum ver-



Abbildung 38: Die HERMES Resultate für das verallgemeinerte GDH-Integral an Proton, Deuterium und Neutron als Funktion der Photon-Virtualität Q^2 . Die Kurven stellen die Beschreibung der Messung im Modell von Soffer und Teryaev dar.

allgemeinerten GDH-Integral rasch mit zunehmender Photon-Virtualität abnimmt, der Beitrag der tiefunelastischen Streuung jedoch selbst bei den kleinsten gemessen Photon-Virtualitäten relevant bleibt (Abb. 38). "Higher twist" Beiträge konnten bisher im Rahmen der erzielten Messgenauigkeit nicht nachgewiesen werden.

Die Differenz der verallgemeinerten GDH-Integrale von Proton und Neutron stellt eine weitere wichtige und fundamentale Größe dar. Bei hohen Photon-Virtualitäten sollte diese Differenz der Bjørken-Summenregel entsprechen. Diese ist eine fundamentale Vorhersage der Quantenchromodynamik und ihr Test ist von großer Wichtigkeit. Experimentell wurde die Bjørken-Summenregel vielfach getestet: Im Rahmen der experimentellen Unsicherheiten befinden sich die Messergebnisse im Einklang mit den theoretischen Erwartungen. Neben direkten Tests stellt auch die Entwicklung der Differenz des verallgemeinerten GDH-Integrals für Proton und Neutron mit zunehmender Photon-Virtualität einen solchen Test dar. Die von HERMES im Rahmen dieser Analyse gewonnen Daten bestätigen ebenfalls die Bjørken-Summenregel bei Berücksichtigung der experimentellen Unsicherheiten.



Abbildung 39: Blick in die HERA-B Halle auf den Detektor.

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 und MEPHI Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

Sprecher: M. Medinnis, DESY

HERA-B ist ein Vorwärtsspektrometer, das Wechselwirkungen zwischen Protonen aus den äußeren Bereichen des HERA-Protonenstrahls und verschiedenen Targets vermisst. Die Targets bestehen aus Drähten unterschiedlichen Materials, die es erlauben, Proton-Nukleon-Wechselwirkungen mit verschiedenen Kernen (Kohlenstoff, Aluminium, Titan, Wolfram) zu untersuchen. Die Wechselwirkungsrate kann, wie in vorhergehenden Jahresberichten detailliert beschrieben, durch eine präzise Einstellung der Drähte in der Richtung quer zum Strahl kontrolliert werden.

Ziel des Experiments HERA-B ist die Untersuchung von Aspekten der Physik von Bottomund Charm-Quarks sowie der Mechanismen, die die Produktion verschiedener in Proton-Nukleon-Wechselwirkungen entstehender Teilchen beschreiben. Die urprünglich wichtigste Aufgabe, die Messung der CP-Verletzung im B-Meson-System, kann von HERA-B nicht erfüllt werden und ist inzwischen von den Experimenten BaBar und BELLE an e⁺e⁻-Speicherringen durchgeführt worden.

Im Jahr 2000 wurde das Spektrometer HERA-B fertig gestellt. Während der ersten längeren Datennahmeperiode von HERA-B wurden etwa 30 Millionen Ereignisse aufgezeichnet. Die Analyse dieser Daten im Berichtszeitraum lieferte wichtige Erkenntnisse über das Verhalten des Detektors, vor allem bezüglich Nachweiswahrscheinlichkeiten und Untergrundraten. Einige der physikalischen Analysen sollen veröffentlicht werden.

Im Jahr 2001 fand eine lange Unterbrechung der Datennahme wegen des Umbaus von HERA statt, die für umfangreiche Reparaturen und Verbesserungen des Detektors genutzt wurde. Zahlreiche Probleme, die teilweise erst während der Inbetriebnahme im Jahr 2000 bekannt geworden waren, konnten gelöst werden.

Eine kurze Datennahmeperiode gegen Ende des Jahres hat bewiesen, dass der Detektor nach der Unterbrechung erfolgreich wieder in Betrieb genommen und sein Zustand durch die umfangreichen Arbeiten erheblich verbessert werden konnte. Die an HERA erreichbaren Ereignisraten waren jedoch minimal, so dass eine physikalische Analyse den Daten des Jahres 2002 vorbehalten bleiben wird.

Der Detektor HERA-B

Der Detektor HERA-B setzt sich aus vier verschiedenen mechanischen Grundeinheiten zusammen (Abb. 39):

- **Vertexplattform:** hier befindet sich der Vakuumtank für Vertexdetektor und Target.
- Magnetplattform: zwischen den Polschuhen des Dipolmagneten sind die inneren Spurkammern (Gra-

nularität von 0.3 mm) und die äußeren Spurkammern (Granularität von 5 bzw. 10 mm) eingebaut.

- Mittelplattform: hier sind das Hauptspurkammersystem sowie die Komponenten für die Teilchenidentifizierung "Ring Imaging Čerenkov" Zähler (RICH), Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) und elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL) untergebracht.
- Myon-Plattform: die Myonkammern hängen hinter bzw. zwischen Eisenabsorbern. Auch hier werden in der Nähe des Strahlrohres Detektoren mit kleiner Granularität (Myon-Pixelkammern) eingesetzt.

Inneres Spurkammersystem

Die Betriebspause von HERA wurde zu Reparaturarbeiten an den Kammern des inneren Spurkammersystems (ITR) und zur Fertigstellung der letzten noch fehlenden drei Halbstationen hinter dem RICH-Detektor genutzt. Alle Stationen wurden ausgebaut, überholt und wieder installiert. 15 Kammern, die entweder defekte GEMs (Gas-Elektronen-Vervielfacher) oder größere fehlerhafte Bereiche in den MSGCs (Mikrostreifengaszähler) aufwiesen, wurden vollständig ausgewechselt. Bei einer erheblichen Zahl von MSGCs waren zu Beginn des Betriebs Kurzschlüsse zwischen einzelnen Anoden und Kathoden aufgetreten. Dabei wird infolge der Hochspannungsverteilung jeweils eine Gruppe von 16 Kanälen, das entspricht 1.6% einer Kammer, kurzgeschlossen. Durch Abtrennen einzelner Leiterbahnen auf den Kaptonbrücken, die von den Verstärkern zu den Anoden führen, konnten diese Ineffizienzen vollständig beseitigt werden. Präventiv wurden Anoden, die bekanntermaßen unterbrochen und deshalb besonders gefährdet sind, Kurzschlüsse zu erzeugen, ebenfalls abgetrennt. Nach dieser recht aufwendigen Arbeit sollten alle toten Bereiche eliminiert sein und Hardware-bedingte Ineffizienzen in den nächsten Jahren auf 1–2% beschränkt bleiben.

Der Betrieb der Detektoren im Jahr 2000 war weitgehend unter der Aufsicht von Experten erfolgt. Dabei registrierte Schwachstellen in Hard- und Software sind nun behoben. Die störanfälligen Niederspannungsnetzgeräte wurden umgerüstet und empfindliche Hochspannungsverbindungen durch Stecker ersetzt. Erheblich verbessert wurde die Kontrollsoftware, die nunmehr



Abbildung 40: Verteilung von Spurresiduen im Inneren Spurkammersystem.

einen sicheren Betrieb durch die Schichtbesatzung ermöglicht. Sie regelt die Spannungen automatisch, auch wenn sie kurzzeitig infolge der unvermeidbaren, sporadisch auftretenden Überschläge in den GEMs unterbrochen werden müssen. Ein neues Histogrammpaket ermöglicht es, komplexe Fehler in den Detektoren, der Ausleseelektronik oder der Spannungsversorgung schnell zu lokalisieren.

Die Spurrekonstruktion im ITR wurde durch Einführung eines auf der Basis Cellularer Automata arbeitenden Systems verbessert. Die ITR-Daten werden nun bei der Analyse mitverwendet. Obwohl die Betriebsbedingungen während der Datennahme 2000 bei den meisten Kammern nicht optimiert werden konnten, ist die Ortsauflösung mit etwa 0.1 mm sehr gut. Dieser Wert ergibt sich aus der Residuenverteilung (Abb. 40) von rekonstruierten Spuren von Teilchen mit Impulsen zwischen 35 und 50 GeV/c. Gleichzeitig zeigt die Verteilung, bei der im Mittel pro Spur 15 Kammern beitragen, die sehr gute Bestimmung der geometrischen Kammerpositionen (Alignment).

Sobald ein stabiler Betrieb von HERA gegeben ist, werden die Kammern innerhalb von zwei bis drei Wochen auf die nominelle Gasverstärkung gebracht. Parallel dazu wird die Bestimmung der Kammerpositionen vorgenommen. Die Betriebsparameter des ITR sollten dann den Designwerten entsprechen.

Äußeres Spurkammersystem

Das äußere Spurkammersystem (OTR) von HERA-B dient dem Nachweis geladener Teilchen ab etwa 20 cm Entfernung vom Protonenstrahl bis hin zur äußeren Akzeptanzgrenze des Experiments. Die Messstationen des Systems, die so genannten Superlagen, sind an verschiedenen Positionen zwischen Vertextank und Kalorimeter senkrecht zum Strahl angeordnet. In jeder Superlage befindet sich eine variable Anzahl ebener Messlagen, die aus Wabendriftkammermodulen zusammengesetzt sind.

Die von September 2000 bis Juli 2001 währende Betriebsunterbrechung von HERA wurde zur Durchführung umfangreicher Reparaturarbeiten an den äußeren Spurkammern genutzt.

Zur Beseitigung des Hauptproblems, der mangelnden Hochspannungsfestigkeit der Driftkammermodule, erwies es sich als notwendig, alle Superlagen vor Ort zu öffnen, die Module zu entnehmen und im Reinraum zu reparieren. Im Zuge dieser Arbeiten wurden insgesamt 14000 unsachgemäß installierte Koppelkondensatoren auf den Hochspannungsplatinen der Module ersetzt. Ferner wurden alle Module, bei denen das nicht schon bei der Produktion geschehen war, mit Kohlefaserstäben mechanisch versteift. Alle reparierten Module durchliefen ähnliche Qualitätstests wie vor der Erstinstallation. Wegen verschärfter Testkriterien erhöhte sich die Zahl deaktivierter Drähte etwas, mit 1.9% liegt die Ausfallrate aber durchaus noch im üblichen Rahmen. Für 80 der insgesamt 978 Module, die die Qualitätstests nicht bestanden oder bereits bei der Erstinstallation irreparabel beschädigt wurden, mussten auf den noch vorhandenen Produktionsanlagen Ersatzmodule gefertigt werden.

Ausgiebige Tests mit den reparierten Superlagen ergaben ein signifikant besseres Langzeitverhalten bezüglich der Hochspannungsstabilität. Die über einen Zeitraum von mehreren Monaten beobachtete Ausfallrate war unter gleichen Bedingungen um einen Faktor zehn niedriger als vorher. Die Tests zeigten außerdem, dass ein sicherer Betrieb der Kammern beim doppelten Wert der nominellen Gasverstärkung (60 000 statt 30 000) möglich ist. Damit wurde Spielraum geschaffen für eine Verbesserung der Zelleffizienz, die während der Datennahme im Jahre 2000 in einigen Kammern mit 85% noch recht weit von den angestrebten 95% entfernt war.

Weitere Maßnahmen zur Effizienzverbesserung setzten bei der Ausleseelektronik des äußeren Spurkammersystems an. Die Signale der Driftkammermodule gelangen zunächst auf Vorverstärker mit integrierten Diskriminatoren, die sich in unmittelbarer Nähe der Signaldurchführungen an den Gasboxen befinden (insgesamt 7200 Stück). Zur digitalen Driftzeitmessung dienen insgesamt 955 TDC-Karten (Time-to-Digital Converter), die sich in am Kammerrahmen montierten Überrahmen befinden. Neben den gemessenen Driftzeiten stellen die TDC-Karten auch die Trefferinformationen für die erste Triggerstufe zur Verfügung. Diese Signale werden mittels so genannter Triggerlink-Karten den Bedürfnissen des Triggers entsprechend zusammengefasst und in optische Signale umgewandelt, bevor sie über Glasfaserleitungen an die Triggerelektronik geschickt werden.

Während der Datennahme im Jahre 2000 wurde beobachtet, dass von den Verbindungen zwischen den TDCund den Triggerlink-Karten ein erheblicher Beitrag zum Rauschen der Ausleseelektronik ausging. Als Folge dessen mussten die Diskriminatorschwellen in den Vorverstärkern erhöht werden, was eine Verschlechterung der Zelleffizienz zur Folge hatte. Abhilfe wurde erst durch die Entfernung der Treiberbausteine von allen TDC-Karten geschaffen. Diese Maßnahme reduzierte das Rauschen der Ausleseelektronik so weit, dass die Diskriminatorschwellen um 20–30 % verringert werden konnten. Das lässt für die kommende Datennahme Verbesserungen sowohl in der Effizienz als auch in der Ortsauflösung des äußeren Spurkammersystems erwarten.

Während des Betriebs im Jahre 2000 zeigten die Signale von 5–10% der optischen Sender auf den Triggerlink-Karten zeitliche Instabilitäten in Form und Pulshöhe, was zu Übertragungsfehlern führte. Dieses Problem wurde durch die Nachinstallation von Steuerstufen für alle Sender behoben. Das komplexe Gassystem, das das gesamte äußere Spurkammersystem mit Gas versorgt, erwies sich während der gesamten Datennahme im Jahr 2000 als weitgehend zuverlässig. Als störend erwiesen sich lediglich einige längere Betriebsunterbrechungen bei Problemen mit den Pumpen im Hauptkreislauf des Systems. Zur Verkürzung solcher Ausfallzeiten bei der kommenden Datennahme wurde hier eine Lecksucheinheit installiert. Zur Minderung der Abhängigkeit der Gasverstärkung in den äußeren Spurkammern von Luftdruck und Umgebungstemperatur wurde eine automatische Regelung der Hochspannung entwickelt, getestet und in Betrieb genommen.

Im Zuge der Neudefinition des Physikprogramms von HERA-B wurden die Vor- und Nachteile der im Magneten befindlichen Kammern des äußeren Spurdetektors sorgfältig gegeneinander abgewogen. Es ergab sich, dass das Kammermaterial im Magneten den Nachweis von Elektronen und Photonen mehr stört als die Anwesenheit zusätzlicher Messstationen der Rekonstruktion von Myonen und geladenen Hadronen nützt. Demzufolge wurden sechs der sieben Kammern aus dem Magneten entfernt.

Im Dezember 2001 wurden erstmals Daten mit dem reparierten und modifizierten äußeren Spurkammersystem genommen. Diese Daten dienten hauptsächlich dazu, die elektronischen Kanäle korrekt auf die Geometrie der Kammern abzubilden, Fehler beim Zusammenbau in den Detektortabellen zu korrigieren, den Zeitnullpunkt für alle Kanäle zu bestimmen, die Relation zwischen Driftzeit und -strecke zu eichen und die Kammerpositionen zu justieren. Die Software für diese Aufgaben war schon in den Vorjahren entwickelt worden. Bereits in den ersten Ergebnissen sind Anzeichen für die erwarteten Verbesserungen von Effizienz und Auflösung des Detektors erkennbar.

Die erste Triggerstufe

Der mehrstufige Trigger von HERA-B dient der effizienten Selektion von Zerfällen schwerer Quarks bei gleichzeitiger Unterdrückung sonstiger Wechselwirkungen um etwa fünf Größenordnungen. Die Identifikation von Leptonen mit hohem Transversalimpuls ist hierbei die entscheidende Signatur, besondere Bedeutung haben die leptonischen Zerfälle von J/ ψ -Mesonen. Abbildung 41 zeigt eine schematische Darstellung des komplexen Trigger- und Datennahmesystems, durch das die Eingangsrate von 10 Millionen Ereignissen pro Sekunde auf etwa 50 archivierte Ereignisse pro Sekunde reduziert wird.

Die Suche nach Elektronen beginnt mit den digitalisierten Informationen des elektromagnetischen Kalorimeters. Neun Kalorimeterzellen werden zu einem Cluster zusammengefasst und, falls dessen transversale Energie über einem Schwellenwert liegt, wird dieser der ersten Triggerstufe ("First Level Trigger" FLT) als Elektronkandidat gemeldet. Für Myonen werden Koinzidenzen in den Pad-Kammern der letzten beiden Superlagen des Myonsystems als Startpunkt benutzt.

Die Vortrigger und der FLT bestehen aus einem Netzwerk von eigens entwickelten Hardwareprozessoren. Aus den Parametern der Kandidaten berechnen die "Track Finding Units" (TFU) Suchfenster in der Spurkammer vor den Vortriggern. Falls hierin eine Koinzidenz von den getroffenen Drähten in drei Projektionen (0, ± 5 Grad Stereolagen) gefunden wird, werden die Parameter der Kandidaten entsprechend der gefundenen Position verbessert und an die TFUs der zum Target hin nächsten Superlage weitergereicht, andernfalls wird der Kandidat verworfen.

Wird die Suche nach Koinzidenzen bis in die Superlage PC1 erfolgreich fortgesetzt, berechnet die "Track Parameter Unit" aus den geometrischen Informationen die kinematischen Parameter der Spur. Die "Trigger Decision Unit" löst einen Trigger aus, wenn die gefundenen Spuren vordefinierte Bedingungen erfüllen. Die erste Triggerstufe verarbeitet etwa 1 Tbit/sec an Informationen von den Spurkammern und kann bis zu 500 Millionen Kandidaten pro Sekunde verfolgen.

Erste Erfahrungen mit diesem Hardwaretrigger sind während der Datennahme im Jahre 2000 gesammelt worden. Es traten Probleme in der optischen Datenübertragung zwischen den Spurkammern und den TFUs auf, die die Inbetriebnahme verzögerten. Die Hardwareprozessoren selbst haben trotz ihrer Komplexität hervorragend funktioniert. Insgesamt war jedoch der zeitliche Aufwand, diesen Trigger zu konfigurieren und das Verhalten zu verstehen, größer als vorhergesehen. Die Inbetriebnahme konnte deshalb damals nicht abgeschlossen werden.



Abbildung 41: Mehrstufiges System zur Datenreduktion und Datenselektion von HERA-B. Das Netzwerk aus etwa 80 Spezialprozessoren der ersten Triggerstufe ist hier nicht ausgeführt.

Im Berichtsjahr wurden die im Jahr 2000 genommenen Daten detailliert untersucht, um die Eigenschaften des FLT zu verstehen und Probleme zu beheben. Durch Vergleich mit aufwendigen Simulationen konnte zum Beispiel im Detail verstanden werden, wie durch die Probleme der Spurkammern die intrinsische Spureffizienz des FLT von 60% auf 18% reduziert wurde. Zwar besteht jede Projektion einer Superlage aus zwei hintereinander liegenden Driftzellen, von denen mindestens eine ansprechen muss, aber geringe Zelleffizienzen und Übertragungsfehler haben im Jahre 2000 zu den beobachteten Verlusten geführt. Durch die bereits beschriebenen Verbesserungen der Spurdetektoren und der Triggerelektronik werden diese für die kommende Datennahme deutlich kleiner sein. Insgesamt wird eine Myoneffizienz des FLT von 55% erwartet.

In einem so genannten Vektortest wird ein Ereignis in die Hardware des FLT geladen und die Ergebnisse ausgewählter Prozessorstufen werden mit der Simulation verglichen. In allen wesentlichen Punkten hat es hier eine vollständige Übereinstimmung gegeben. Mittels der Simulation kann die komplizierte Hardware also sehr genau beschrieben werden. Dies hilft nicht nur zur Bestimmung von Effizienzen, sondern bedeutet auch, dass das Verhalten der Hardware verstanden ist. Weitere Verbesserungen an der Software tragen dazu bei, dass der FLT für die kommende Datennahme schnell eingesetzt werden kann. Der Bereich der inneren Spurkammern (Inner Tracker und Myon Pixel System) wird voraussichtlich für den FLT auch im Jahre 2002 nicht zur Verfügung stehen.

Die zweite Triggerstufe

Die zweite Triggerstufe ("Second-Level-Trigger" SLT) besteht aus einer Farm von 240 PCs und greift auf die gesamten Daten des Detektors zu. Ereignisse mit einer Rate von 30–50 kHz können verarbeitet werden. Ausgehend von den Spurparametern des FLT werden zusätzliche Superlagen in den Spurkammern und die Daten des Vertexdetektors benutzt, um falsche Spuren (Geister) zu verwerfen und die Spuren besser zu bestimmen. Hinzu kommt die Möglichkeit, für Spurpaare einen gemeinsamen Vertex zu verlangen und die invariante Masse zu berechnen.

Auch für die kommende Datennahme wird, wie schon im Jahr 2000, die Hauptlast des Triggerns beim SLT liegen. Die Effizienz der ersten Triggerstufe (FLT) ist vermutlich nicht hoch genug, um beide Leptonen für die Rekonstruktion von J/ ψ -Zerfällen zu identifizieren. Die optimale Zahl an auf Magnetband gespeicherten J/ ψ -Ereignissen wird erreicht, wenn ein Lepton mit dem FLT identifiziert wird und der SLT die weitere Rekonstruktion inklusive der Suche nach einem weiteren Lepton übernimmt. Dies bedeutet eine Begrenzung der Wechselwirkungsrate der Protonen auf 5–10 MHz. Bei diesem Verfahren werden alle Spurkandidaten der Vortrigger und die gefundenen Spuren des FLT an den SLT übergeben.

Die zweite Triggerstufe wird deshalb, ähnlich wie im Jahre 2000, ausgehend von den Vortriggern eine eigenständige Spursuche durchführen. Allerdings sind bedeutende Verbesserungen im Berichtszeitraum vorgenommen worden. Hierzu zählen

- ein um einen Faktor 2–3 schnellerer Zugriff auf die Daten des Myonsystems durch eine Reduktion der Datenmenge,
- ein schnellerer Zugriff auf die Daten der äußeren Spurkammern (OTR) durch die Bündelung mehrerer Datenpakete,

- eine Spurverfolgung auch im inneren Bereich des Detektors (Myon Pixel System und ITR), die zuvor nicht existiert hat,
- eine höhere Spureffizienz durch Veränderungen im Algorithmus,
- eine Reduktion der CPU-Zeit durch Verbesserungen in der Suche nach Clustern im ITR und deutliche Verbesserungen bei der Spurverfolgung im Vertexdetektor,
- ein Austausch der 300 MHz und 450 MHz CPUs durch 1300 MHz CPUs,
- eine größere Reduktion an Geisterspuren durch das Auswerten der Driftzeiten im OTR,
- das Ausnutzen der Magnetkammern nahe dem Vertexdetektor zur Reduktion der Suchfenster.

Aufgrund dieser Verbesserungen ist der SLT für die bevorstehende Datennahme sehr flexibel und kann mit unterschiedlichen Eingangsdaten (FLT-Spuren, Vortriggerkandidaten) arbeiten.

Die Verbesserungen der Detektoren und der Triggerkette lassen eine erhebliche Steigerung der Rate registrierter J/ ψ -Ereignisse gegenüber dem Jahr 2000 erwarten. Detaillierte Simulationsrechnungen lassen eine Verbesserung um einen Faktor 60 nicht unrealistisch erscheinen.

Die Datennahme

Die digitalisierten Daten der Front-End Elektronik werden in so genannten "Second Level Buffern" (SLB) für jede positive Entscheidung der ersten Triggerstufe zwischengespeichert. Die zweite Triggerstufe kann auf sämtliche SLBs mittels des SWITCH zugreifen. Letzterer ist wie die SLBs mit SHARC DSP-Prozessoren von AnalogDevices realisiert. Diese Hardware und die entsprechende Software wurden im Jahre 2000 vollständig in Betrieb genommen.

Nach einer positiven SLT-Entscheidung werden die Ereignisse vollständig auf einer weiteren PC Farm (100 Dual-Prozessor PCs) online rekonstruiert und auf Magnetband gespeichert. Diese Farm wurde im Berichtszeitraum auch zur Rekonstruktion der Daten aus dem Jahr 2000 (30 Millionen Ereignisse) benutzt. Dieser Prozess wurde praktisch vollständig automatisiert, die Daten wurden dreimal mit jeweils verbesserten Konstanten und Algorithmen prozessiert.

Zu Beginn einer Datennahme werden über 2000 Prozesse in etwa zwei Minuten gestartet. Dies hat im Jahr 2000 routinemäßig funktioniert. Die Erfahrung zeigte jedoch, dass solch ein kompliziertes System anfällig gegen Störungen ist. Im Berichtszeitraum wurden deshalb Schwachstellen in der Struktur der Datennahme verbessert. Hierzu zählt die Abhängigkeit vom DESY-Rechenzentrum, dessen Ausfall insbesondere an Wochenenden zu erheblichen Störungen geführt hatte. Die Kommunikation zwischen den gestarteten Prozessen ist durch die Verwendung von "Multiple Threads" deutlich zuverlässiger geworden, hinzu kommen Verbesserungen in der Bandbreite von allen an der Datenübertragung beteiligten Systemen um einen Faktor 2 sowie größere Zwischenspeicher für das Puffern von Daten.

Physikalische Resultate

Im Berichtszeitraum wurde die Analyse der im Jahr 2000 aufgenommenen Daten fortgesetzt. Es wurden entscheidende Fortschritte in der Auswertung der Daten und im Verständnis des Detektors gemacht.

Die Inbetriebnahme des Detektors und Tests einzelner Detektorkomponenten haben dazu geführt, dass es kaum längere Messperioden unter stabilen Bedingungen gab. Zudem lagen Detektorakzeptanzen und die Leistungsfähigkeit des Triggers weit unter den für das Jahr 2002 zu erwartenden Werten. Infolgedessen waren sowohl die zur Analyse zur Verfügung stehende Statistik als auch generell alle Nachweiswahrscheinlichkeiten klein. Trotzdem wurden einige signifikante Resultate erzielt, deren wichtigste im Folgenden erwähnt werden sollen.

Der Zerfall $J/\psi \rightarrow \ell^+ \ell^-$

 J/ψ -Mesonen sind in zweifacher Weise für die hier vorgestellten Analysen interessant: zum einen dienen sie zum Nachweis von B-Mesonen im Zerfall B $\rightarrow J/\psi X$, dann nämlich, wenn sich zwischen Entstehungs- und



Abbildung 42: Verteilung der invarianten Massen von $\mu^+\mu^-$ -Paaren (Kreuze) mit einem deutlichen Signal für das J/ψ . Die durchgezogene Linie zeigt eine Anpassungsrechnung mit einer Gauß-Funktion für das Signal. Die Form des Untergrundes wird gut durch die Massenverteilungen gleichgeladener Paare ($\mu^+\mu^+$ und $\mu^-\mu^-$) wiedergegeben (gestrichelte Linie).

Zerfallspunkt des J/ψ eine messbare Distanz, die Flugstrecke des B-Mesons, erstreckt. Zum anderen kann durch sie die direkte Produktion von Charmonium in p N-Wechselwirkungen untersucht werden.

Abbildung 42 zeigt das Spektrum der invarianten Masse von $\mu^+\mu^-$ -Paaren. Zur Identifikation der Myonen wurde Information sowohl der Myonkammern als auch des Čerenkovzählers benutzt. Ein deutliches Signal des J/ ψ ist zu erkennen. Die Masse ist um 2% kleiner und die Breite um 35% größer als von Monte Carlo-Berechnungen vorhergesagt. Diese Effekte sind der noch nicht perfekten Kalibrierung des Detektors zuzuschreiben. Insgesamt können in diesem Zerfallskanal 3840±85 J/ ψ -Mesonen nachgewiesen werden.

Für die Messung des Zerfalls $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ werden Spuren benutzt, bei denen, wie für Elektronen erwartet, der in den Spurkammern gemessene Impuls der Energie entspricht, die im elektromagnetischen Kalorimeter deponiert wird.

Diese Messung wird dadurch kompliziert, dass Elektronen eine hohe Wahrscheinlichkeit haben, vor Erreichen des Kalorimeters einen erheblichen Anteil ihrer Energie durch Bremsstrahlung zu verlieren. Findet die Bremsstrahlung vor dem Magneten statt, so werden Elektron und Bremsstrahlungs-Photon im Magneten



Abbildung 43: Verteilung der invarianten Massen von e^+e^- -Paaren mit einem Signal für das J/ψ . (a) alle Kombinationen von Spuren, die gemäß der Messung im elektromagnetischen Kalorimeter mit der Elektronbzw. Positronhypothese verträglich sind; (b) für mindestens eine und (c) für beide Spuren wird zusätzlich der Nachweis eines Bremsstrahlungs-Photons verlangt (siehe Text). Die Kurve zeigt das Ergebnis einer Anpassungsrechnung mit einem Polynom für den Untergrund, einer Gauß-Funktion für das J/ψ und einer zweiten Gauß-Funktion für mögliche Beiträge vom ψ' .

separiert und im Kalorimeter getrennt nachgewiesen. Hierdurch ergeben sich zwei Vorteile: zum einen kann die Genauigkeit der Energiemessung des Elektrons erhöht werden, indem man die Energie des Photons hinzuaddiert, zum anderen ist die bloße Anwesenheit eines Bremsstrahlungs-Photons ein starkes Indiz dafür, das es sich um ein Elektron und nicht um ein anderes geladenes Teilchen handelt.

Die Forderung, dass für eines oder sogar beide Teilchen der e^+e^- -Kombinationen ein Bremsstrahlungs-Photon nachgewiesen werden muss, führt also zu einem schmaleren Signal und einem deutlich verbesserten Verhältnis von Signal zu Untergrund, allerdings bei einer erheblich reduzierten Nachweiswahrscheinlichkeit. Abbildung 43 zeigt die Verteilung der invarianten Masse von e^+e^- -Kombinationen mit den Anforderungen, dass keines, mindestens eins oder jedes der beiden Bremsstrahlungs-Photonen nachgewiesen werden muss. Die Signale für das J/ ψ enthalten jeweils 2553 ± 292 , $1420 \pm 70 \pm 48$ und $308 \pm 24 \pm 6$ Ereignisse.

Differentielle Produktionswirkungsquerschnitte für J/ψ-Mesonen

Die rekonstruierten Zerfälle von J/ ψ -Mesonen werden dazu benutzt, Eigenschaften ihrer Produktion zu untersuchen; für die hier dargestellte Analyse ist bisher nur der Zerfall J/ $\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ benutzt worden. So kann nach Abhängigkeiten vom Targetmaterial gesucht werden, wobei etwa 3000 der J/ ψ -Mesonen von einem Kohlenstofftarget und 1000 von einem Titantarget stammen.

Das Transversalimpulsspektrum ist in Abbildung 44 dargestellt, die die gute Übereinstimmung der Ergebnisse von HERA-B mit anderen Experimenten zeigt. Die Daten können gut beschrieben werden durch die Funktion dN/dp_T² = $A \cdot (1 + (p_T/p_0)^2)^{-6}$, die es ermöglicht, den mittleren Transversalimpuls $\langle p_T \rangle$ zu berechnen. Die Ergebnisse für die verschiedenen Targets sind $\langle p_T \rangle_C = (1.220 \pm 0.021)$ GeV/c und $\langle p_T \rangle_{Ti} = (1.256 \pm 0.036)$ GeV/c. Größere Statistik ist nötig, um mögliche Unterschiede zwischen verschiedenen Targetmaterialien signifikant nachzuweisen.

Eine ähnliche Situation ergibt sich bei der Untersuchung der x_F Spektren, die in Abbildung 45 dargestellt sind. Die Übereinstimmung mit anderen Experimenten ist gut; signifikante Unterschiede zwischen Kohlenstoffund Titantarget können noch nicht nachgewiesen werden.

Bemerkenswert ist, dass kein anderes Experiment so kleine Werte von x_F erreichen kann wie HERA-B.

Produktion von \chi_c-Mesonen

Produktion von Charmonium in Hadron-Kollisionen ist unter zwei Gesichtspunkten interessant: erstens, um



Abbildung 44: Differentieller Wirkungsquerschnitt für J/ψ -Produktion als Funktion des Transversalimpulses. Die Daten von HERA-B sind für Kohlenstoff- und Titantarget zusammengefasst. Die Kurve zeigt das Ergebnis einer Anpassungsrechnung (siehe Text). Die Skala der Abszisse ist willkürlich, da kein totaler Wirkungsquerschnitt bestimmt wurde. Der Vergleich verschiedener Experimente zeigt gute Übereinstimmung.

den Einfluss des Targetmaterials auf den Wirkungsquerschnitt zu untersuchen und zweitens, um den Produktionsmechanismus zu verstehen. Dabei bildet die Bestimmung der relativen Produktionsrate von J/ ψ und χ_c -Mesonen einen besonders sensitiven Test (χ_c steht hier für die Kombination von χ_{c1} und χ_{c2} , die von HERA-B nicht aufgelöst werden können).

Das Colour-Singlet-Modell (CSM) und die nichtrelativistische QCD (NRQCD) sagen unterschiedliche Werte für das Verhältnis

$$R_{\chi_c} = \sigma(\chi_c) Br(\chi_c \to J/\psi\gamma) / \sigma(J/\psi)_{tot}$$



Abbildung 45: Differentieller Wirkungsquerschnitt als Funktion von x_F . Die Kurve zeigt eine Anpassung der Funktion $dN/dx_F = A \cdot (1 - |x_F|)^c$ an die Daten von HERA-B. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit Resultaten anderer Experimente. HERA-B ist das Experiment, das wesentlich zu Messungen bei negativem x_F beiträgt.

voraus, während das Colour-Evaporation-Modell (CEM) verlangt, daß R_{χ_c} unabhängig sowohl von Target- und Strahlmaterial als auch von der Energie ist.

Das Signal für das χ_c wird in der Verteilung der Massendifferenzen $M(J/\psi\gamma) - M(J/\psi), J/\psi \rightarrow \ell^+ \ell^-$ gesucht (Abb. 46). Nach Abzug des Untergrundes, der durch Kombinationen bestimmt wird, bei denen J/ψ und γ aus verschiedenen Ereignissen stammen, ergibt sich ein Signal von $(381 \pm 81)\chi_c$ -Ereignissen.

Daraus ergeben sich, aufgeschlüsselt nach Targetmaterial, die Werte $R_{\chi_c} = 0.36 \pm 0.07$ für Kohlenstoff und $R_{\chi_c} = 0.31 \pm 0.11$ für Titan (Abb. 47). Diese Werte unterstützen die Modelle NRQCD und CEM, während CSM nicht mit den Daten verträglich ist.



Abbildung 46: Verteilung der Massendifferenzen $M(J/\psi\gamma) - M(J/\psi)$, $J/\psi \rightarrow \ell^+ \ell^-$. Links: der Untergrund (schraffiert) ist durch Kombinationen gegeben, in denen J/ψ und γ aus verschiedenen Ereignissen stammen. Rechts: dieselbe Verteilung, der Untergrund ist subtrahiert. Die Kurve zeigt eine Anpassung mit einer Gauß-Funktion.

Die Resultate von HERA-B sind in guter Übereinstimmung mit allen anderen Experimenten außer einem. Trotz der kleinen Statistik trägt HERA-B signifikant zur Kenntnis von R_{χ_c} bei.



Abbildung 47: Vergleich der Werte für R_{χ_c} von HERA-B und anderen Experimenten. R_{χ_c} ist das Verhältnis zwischen $J/\psi s$, die aus χ_c -Zerfällen stammen, und allen $J/\psi s$. Die senkrechten Linien zeigen Modellvorhersagen an: nicht-relativistische QCD und Colour-Singlet-Modell.

bb-Wirkungsquerschnitt

Die Untersuchung des Zerfalls $B \rightarrow J/\psi X, J/\psi \rightarrow$ e⁺e⁻ hat wegen der geringen im Jahr 2000 gesammelten Statistik nur begrenzte Signifikanz. Dennoch wurde bereits ein interessantes Resultat erzielt, dessen Unsicherheit mit der älterer Messungen vergleichbar ist. J/ ψ -Mesonen, die nicht direkt, sondern beim Zerfall eines B-Mesons produziert werden, haben einen positiven Abstand vom Target, der durch die Flugstrecke des B-Mesons gegeben ist. Daher werden für diese Analyse Ereignisse selektiert, in denen ein rekonstruiertes J/ ψ zwar einem Target zugeordnet werden kann, aber in Strahlrichtung einen Abstand Δz von mindestens 5 mm aufweist, so genannte "downstream"-Ereignisse. Zur Untergrundabschätzung werden gleicherweise "upstream"-Ereignisse mit entsprechendem negativen Abstand untersucht.

Aus dem beobachteten Überschuss von J/ ψ -Ereignissen "downstream" kann durch Extrapolation auf den gesamten Raumwinkel und durch Normalisierung auf den bekannten Wirkungsquerschnitt für prompte J/ ψ -Produktion der Wert für den bb-Produktionsquerschnitt abgeleitet werden. Das Resultat ist

 $\sigma(b\bar{b}) = \left(32^{+15}_{-12} \,(\text{stat}) \pm 8 \,(\text{sys})\right) \text{nb/nucleon} \,.$



Abbildung 48: Gemessener Wirkungsquerschnitt für bb-Erzeugung im Vergleich mit den Werten früherer Experimente (Datenpunkte) und den Erwartungen neuerer theoretischer Rechnungen (Bänder).

Abbildung 48 zeigt den von HERA-B gemessenen Wert im Vergleich mit den Werten früherer Experimente und den Erwartungen neuerer theoretischer Rechnungen.

Mit der in der kommenden Datennahmeperiode zu erwartenden Statistik sollte die erste präzise Messung des B Produktionsquerschnitts in diesem Energiebereich möglich sein.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Jahr 2001 wurde während der Umbauphase von HERA erfolgreich für umfangreiche Reparaturen und Optimierungen von HERA-B genutzt. Der Detektor konnte gegen Ende des Jahres in weitaus besserem Zustand als zuvor wieder in Betrieb genommen werden.

Die voraussichtlich verbleibende Messzeit von HERA-B von etwa einem Jahr wird im Wesentlichen für die Untersuchung von QCD und Charmoniumproduktion genutzt. Insbesondere können Wirkungsquerschnitte von Charmonium und B-Mesonen in p N-Wechselwirkungen an verschiedenen Targetmaterialien bestimmt werden. Bemerkenswert ist, dass HERA-B am weitesten in Bereiche von negativem x_F vordringen kann, der für das Verständnis der Charmoniumproduktion von besonderer Bedeutung ist.

Gegenüber der Datennahme des Jahres 2000 sind erhebliche Verbesserungen für physikalische Analysen zu erwarten. Ein insgesamt längerer Datennahmezeitraum mit stabileren Messbedingungen wird die Luminosität vergrößern. Höhere Detektorakzeptanzen und, teilweise dadurch bedingt, höhere Triggereffizienzen werden die Nachweiswahrscheinlichkeiten bei vielen der vorgesehenen Analysen um mehr als eine Größenordnung verbessern.

Forschung an Lepton Collidern



Abbildung 49: Perspektivische Ansicht des TESLA-Detektors.

Forschung an Lepton Collidern

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

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

Im Frühjahr 2001 konnte in einer gemeinsamen Anstrengung vieler Gruppen und Institute der "Technical Design Report" für TESLA veröffentlicht werden.

Seitdem konzentrieren sich die Arbeiten auf zwei Gebiete: eine weitere Ausarbeitung des Physik-Programms von TESLA, besonders in Bereichen, die im TDR nicht ausreichend behandelt werden konnten, und die Organisation konkreter Detektorentwicklungsprojekte, um die in den Vorarbeiten zum TDR aufgeworfenen technischen Fragen zu beantworten.

ECFA verlängerte das Mandat der ECFA/DESY Studie um zwei weitere Jahre, mit dem Auftrag, die Studien zum physikalischen Potenzial eines Linear-Colliders mit einer Energie zwischen 90 und 800 GeV weiter auszuarbeiten. Die Gruppe FLC spielt weiterhin in dieser Studie eine zentrale Rolle.

Der Linear-Collider TESLA

Mit der Vorstellung des Technical Design Reports für TESLA wurde eine viele Jahre währende Arbeitsphase abgeschlossen und gleichzeitig eine neue Phase auf dem Weg zu einer Realisation eines Linear-Colliders begonnen. Das physikalische Potenzial eines Beschleunigers wie TESLA ist klar ausgearbeitet und umfassend präsentiert worden. Die technische Realisation der Maschine als supraleitender Beschleuniger ist im Detail dargelegt worden. In den Monaten nach der Veröffentlichung des TDR hat es viele Aktivitäten im Bereich der internationalen Teilchenphysik gegeben, die dazu geführt haben, dass sich in Europa, den USA und Asien die Teilchenphysiker darauf geeinigt haben, dass ein Linear-Collider, wie zum Beispiel TESLA, das nächste wichtige Projekt ist. In Europa wurde dies von einer Arbeitsgruppe von ECFA formuliert, in den USA in einem großen Treffen der amerikanischen Teilchenphysiker in Snowmass im Sommer des Jahres 2001 ausgearbeitet. Das HEPAP Panel in den USA hat die Ergebnisse von Snowmass aufgegriffen und veröffentlicht. In Asien sind ähnlich lautende Empfehlungen vom ACFA, dem "Asian Committee for Future Accelerators", herausgegeben worden.

Nach wie vor werden verschiedene technische Vorschläge für einen Linear-Collider diskutiert, von denen einer TESLA ist. Auf Initiative von ICFA ist eine Kommission eingesetzt worden, die einen technischen Vergleich der verschiedenen Vorschläge durchführen soll. Das Ergebnis dieses Vergleiches wird für Ende 2002 erwartet.

Studien der Physik bei TESLA

Das physikalische Potenzial des Linear-Colliders TESLA wurde im Jahresbericht 2000 ausführlich beschrieben. Es ist im TDR für TESLA dokumentiert worden. Im Jahre 2001 wurden Untersuchungen vertieft, die für den TDR noch nicht abschließend behandelt wurden, und offene Fragestellungen wurden angegangen. Besonders betont wurde auch die weitere Ausarbeitung der Stellung des Linear-Colliders relativ zum LHC. Eines der Ziele der "Extended ECFA/DESY Study" ist es auch, in verstärktem Maße Ergebnisse, die mit Hilfe parametrischer Monte Carlo-Studien erzielt wurden, mit voller Simulation des Detektors und aller Untergründe zu wiederholen und zu überprüfen.

Higgs-Physik

Der Schwerpunkt der bisherigen Studien der Higgs-Physik lag bei der Untersuchung von Szenarien mit relativ leichten Higgs-Bosonen, wie sie auch von den vorliegenden Messungen bevorzugt werden. Trotzdem wurde in den letzten Monaten im Detail untersucht, wie das Potenzial von TESLA für schwerere Higgs-Bosonen aussieht. Je nach der Masse des Higgs-Bosons ergeben sich unterschiedliche Probleme. Ab einer Masse von etwa der doppelten W-Masse ist der dominante Zerfall des Higgs-Bosons nicht mehr ein Zerfall in ein Paar von b-Quarks, sondern in W Paare. Oberhalb einer Masse von etwa der doppelten Z-Masse bekommt der Zerfall in zwei Z-Bosonen große Wichtigkeit. Diese Effekte verändern die Rekonstruktionsmethoden und auch die Untergründe erheblich. Gleichzeitig wird die Breite des Higgs-Bosons bei höheren Massen größer, so dass die sichtbaren Signale schwerer vom Untergrund zu trennen sind. In Abbildung 50 ist das rekonstruierte Higgs-Signal für ein Higgs-Boson der Masse 240 GeV gezeigt. Ein klares Signal ist sichtbar, mit nur sehr geringem Untergrund. Die Masse lässt sich auf $\pm 0.1\%$ bestimmen, die Breite auf $\pm 12\%$ und der totale Wirkungsquerschnitt auf $\pm 4\%$. Mit dieser Methode lassen sich an einem Beschleuniger mit einer Schwerpunktsenergie von 500 GeV Higgs-Bosonen mit Massen bis etwa 400 GeV untersuchen.

In manchen Modellen zerfallen die Higgs-Bosonen mit großer Wahrscheinlichkeit in Teilchen, die im Detektor nicht direkt nachgewiesen werden können. Dies ist zum Beispiel in einigen supersymmetrischen Modellen der Fall, oder auch in Modellen mit großen extra Dimensionen, die in den letzten Monaten intensiv diskutiert worden sind. Bisher wurden Zerfälle in unsichtbare Teilchen nur für den Fall untersucht, dass das Higgs-Boson im Higgs-Strahlungs-Prozess durch Abstrahlung von einem Z erzeugt wurde, und dass das Z-Boson leptonisch zerfällt.



Abbildung 50: Rekonstruierte Massenverteilung für ein Higgs-Boson der Masse 240 GeV. Gezeigt sind die Beiträge von $H \rightarrow WW$ und $H \rightarrow ZZ$ Zerfällen, und die abgeschätzten Untergründe.



Abbildung 51: Genauigkeit, mit der das Verzweigungsverhältnis $BR(H \rightarrow inv)$ rekonstruiert werden kann. Die Punkte zeigen das Ergebnis der simulierten Analyse, die durchgezogenen Linien die theoretischen Unsicherheiten für verschiedene Higgs-Massen.

Eine neue Studie erweitert die Szenarien auf den allgemeineren Fall, dass das Z auch in hadronische Endzustände zerfällt. Dadurch erhöht sich die Zahl der beobachtbaren Zerfälle erheblich, gleichzeitig wird der Untergrund aber auch höher. Durch geeignete Rekonstruktionsmethoden und unter Ausnutzung der exzellenten Massenauflösung des TESLA-Detektors konnte gezeigt werden, dass eine Abtrennung des Signals vom

Forschung an Lepton Collidern

Untergrund möglich ist. In Abbildung 51 ist die Genauigkeit gezeigt, mit der für verschiedene Higgs-Massen das Verzweigungsverhältnis $BR(H \rightarrow inv)$ gemessen werden kann.

Supersymmetrie

Eine wichtige Motivation für TESLA ist die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells. Supersymmetrie ist eine besonders attraktive und vielversprechende Erweiterung des Standardmodells. Viele Studien wurden durchgeführt, um zu untersuchen, inwieweit TESLA in der Lage sein wird, Supersymmetrie nachzuweisen. Ein besonderes Problem sind Modelle, in denen der Massenunterschied zwischen dem leichtesten SUSY Teilchen und dem zweitleichtesten Teilchen sehr klein wird. Besonders schwierig ist dabei der Fall, dass die Massendifferenz gerade ein Pion als weiteres Zerfallsprodukt zulässt. Aufgrund des hohen Untergrundes im Detektor ist eine saubere Identifikation dieser Ereignisse mit großen Problemen verbunden. Andererseits erzwingt aber der nur sehr begrenzt vorhandene Phasenraum für das Pion eine relativ klare Impulsverteilung dieser Teilchen. Dies ist in Abbildung 52 gezeigt. Hier wird die rekonstruierte Energie der Pionen für zwei Annahmen, $\Delta M = 0.2 \text{ GeV}$ und $\Delta M = 0.4 \text{ GeV}$, gezeigt. Die Verbreiterung der Pionen-Linie bei der größeren Massendifferenz ist sichtbar, aber das Signal ist immer noch klar erkennbar.

Die angeführten Untersuchungen stellen nur einige wenige Beispiele dar aus den Arbeiten, die im Rahmen der ECFA/DESY Studie im letzten Jahr begonnen wurden. Es wird erwartet, dass im Laufe der nächsten eineinhalb Jahre, bis zum Ende dieser Studie, die im TDR veröffentlichten Arbeiten durch ein breites Spektrum weiterer Untersuchungen erweitert werden, die das physikalische Potenzial von TESLA weiter untermauern und ausbauen.

Software-Entwicklungen für TESLA

Geeignete und leistungsfähige Software Pakete sowohl für die Simulation als auch für die Rekonstruktion von Ereignissen erlangen eine immer größere Bedeutung



Abbildung 52: Energieverteilung der Pionen im Zerfall $X \rightarrow \pi Y$, mit X,Y dem leichtesten und zweitleichtesten supersymmetrischen Teilchen.

schon während der Entwicklung der Projekte. Nach Fertigstellung des TDR hat im Rahmen der ECFA/DESY Studie ein Prozess eingesetzt, eine moderne Software-Umgebung für die Simulation des TESLA-Detektors zu entwickeln. Gemäß dem industriellen Standard soll diese auf Objekt-Orientierten Technologien beruhen, gleichzeitig aber dem Benutzer einen einfachen und transparenten Zugang zu den Programmpaketen ermöglichen.

In Zusammenarbeit mit Gruppen in Frankreich und den USA wurde begonnen, die Simulation von dem auf GEANT3 und Fortran basierenden Programm auf das Objekt-Orientierte Programmpaket GEANT4 und C++ umzustellen.

Im Laufe des Jahres sind die Arbeiten am Rekonstruktionsprogramm fortgeführt worden. Besonders wichtig ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Bestimmung des Energieflusses im Detektor. Im Konzept des Energieflusses werden die Informationen aus dem Spur-



Abbildung 53: Massenverteilung des Z-Bosons, rekonstruiert in hadronischen Z-Zerfällen.

kammersystem mit Informationen aus dem Kalorimeter kombiniert, um eine optimale Rekonstruktion der Vierervektoren der Partonen, die das Ereignis erzeugt haben, zu erreichen. Aufgrund der sehr hohen Granularität des vorgeschlagenen TESLA-Kalorimeters sind völlig neue Techniken notwendig, um die Information optimal auszuwerten.

In Abbildung 53 ist die rekonstruierte Massenverteilung von Z-Bosonen gezeigt. Die Masse wurde nur aus den Informationen errechnet, die der Energiefluss-Algorithmus liefert. Die Breite der Verteilung entspricht einer Energiefluss-Auflösung von $29\%/\sqrt{E}$ und ist damit etwa einen Faktor zwei besser als die beste bisher erreichte Auflösung.

Detektorstudien für TESLA

Für den TDR wurde im Detail ein Detektorkonzept ausgearbeitet. Dieses Konzept sieht einen großen Detektor vor mit einem relativ konventionellen inneren Detektor für die Spurrekonstruktion, einem hochauflösenden Kalorimeter und einem Myon-System, das den gesamten Detektor umgibt. Spurkammern und Kalorimeter befinden sich innerhalb einer Magnetspule, die ein solenoides Feld von 4 T erzeugt.

Obwohl das Konzept des Detektors konventionell ist, sind die Anforderungen an die einzelnen Komponenten sehr hoch. Verglichen mit existierenden Detektoren soll die Auflösung in allen Bereichen deutlich verbessert werden - im Spurkammersystem um eine Größenordnung, im Kalorimeter soll die Energiefluss-Auflösung um mindestens einen Faktor zwei verbessert werden. Um diese Ziele zu erreichen, sind dedizierte Entwicklungsarbeiten an einzelnen Detektorkomponenten notwendig. DESY hat deshalb ein Entwicklungsprogramm ins Leben gerufen, in dessen Rahmen Gruppen Vorschläge für Detektorentwicklungsarbeiten unterbreiten können. Diese Vorschläge werden dann vom DESY "Program Review Committee" begutachtet, und im Falle der Annahme als offizielle DESY R&D Programme geführt. Im Berichtszeitraum sind vier Programme für Entwicklungsarbeiten vom DESY anerkannt worden, zwei für Silizium Vertex-Detektoren, eines für Entwicklungsarbeiten einer "Time Projection Chamber" (TPC) und eines für Entwicklung der Kalorimetrie. Die Gruppe FLC ist an den beiden letzten Projekten aktiv beteiligt.

Time Projection Chamber

Der volumenmäßig größte Teil des Zentraldetektors ist die Time Projection Chamber. Aufgabe der TPC ist es, die Spuren geladener Teilchen möglichst genau zu vermessen und Zerfälle langlebiger Teilchen zu rekonstruieren. Gleichzeitig erlaubt die Messung des spezifischen Energieverlustes dE/dx im Gas der TPC eine Identifikation verschiedener geladener Teilchentypen. Die im TDR vorgeschlagene TPC hat einen innerern Radius von 32 cm, einen äußeren Radius von 162 cm und eine Länge von etwa 5 m. Entlang einer Spur werden bis zu 200 Spurpunkte aufgezeichnet. Die TESLA-TPC unterscheidet sich in einem Punkt wesentlich von allen bisher gebauten TPCs: es ist vorgesehen, die Auslese der Ladung, die von den Spuren in der TPC erzeugt wird, nicht mittels Vieldrahtproportionalkammern durchzuführen, sondern Gas-Mikrodetektoren zu verwenden. Zwei Technologien werden momentan diskutiert, "Gas Electron Multipliers" (GEMs) und Micromega Kammern.

Eine Gruppe von etwa 15 Instituten aus aller Welt, einschließlich Kanada und den Vereinigten Staaten, hat



Abbildung 54: Links: Photo der Test TPC. Rechts: Ansicht der Elektrodenstruktur, die in der Test TPC verwendet wird.

gemeinsam ein PRC Proposal vorgelegt, eine solche TPC zu entwickeln. Die Gruppe FLC ist an diesem Programm mit intensiven Untersuchungen an einer mit GEMs instrumentierten TPC beteiligt.

Eine GEM bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber einer konventionellen, mit Drähten ausgerüsteten TPC. Die Menge an Material, die für die Auslese verwendet werden muss, kann vermutlich bei einer GEM-Auslese deutlich reduziert werden. Dies hat wichtige Auswirkungen auf die Funktion des Kalorimeters in der Endkappe des Detektors, das vollständig hinter dem Auslesesystem der TPC liegt. Fast wichtiger ist aber, dass die GEM-Folie einen Effekt, der einen wichtigen Beitrag zum systematischen Fehler einer konventionellen TPC leistet, nicht zeigt. In einer konventionellen TPC enstehen in der Nähe der Drahtebenen erhebliche Verzerrungen der Driftlinien, entlang derer die Elektronen zu den Drähten driften. Diese führen zu einem nicht vernachlässigbaren systematischen Fehler bei der Ortsbestimmung. Da die Verstärkungselemente der GEM erheblich dichter (etwa einen Faktor 10) zueinander angeordnet sind, als es die Drähte in einer Kammer sein können, ist zu erwarten, dass sich die Verzerrungen ensprechend reduzieren.

Darüber hinaus unterdrücken GEMs den Fluss positiver Ionen, die im Verstärkungsprozess produziert werden, in das aktive Kammervolumen. Dies eröffnet die Möglichkeit, eine mit GEMs ausgerüstete TPC ohne Totzeit bei TESLA zu betreiben. In Hamburg sind zwei Testkammern aufgebaut worden, um wesentliche Parameter der TPC zu messen und die angesprochenen systematischen Effekte zu untersuchen. In einer großen Kammer werden Spuren kosmischer Myonen vermessen und dazu verwendet, Auflösungen, Driftverhalten usw. über lange Distanzen zu studieren. Ein Photo der TPC und der Ausleseelektroden ist in Abbildung 54 zu sehen. Diese Kammer operiert bisher ohne ein magnetisches Feld. Ein Beispiel für ein in der Kammer rekonstruiertes Myon ist in Abbildung 55 gezeigt.



Abbildung 55: Spur eines kosmischen Myons, rekonstruiert in der TPC.



Abbildung 56: Gemessene Gasverstärkung als Funktion der Zeit in der TPC.

Eine wichtige Frage ist, wie stabil eine mit GEMs ausgerüstete Kammer ist. Wenn mit der Kammer der spezifische Energieverlust von Teilchen gemessen werden soll, müssen die Parameter über längere Zeiträume konstant gehalten werden, und die Variationen von Auslesezelle zu Auslesezelle sollten nicht zu groß sein. In der Prototyp-Kammer am DESY ist untersucht worden, wie groß die Unterschiede von Zelle zu Zelle sind, und wie stark die Eigenschaften sich mit der Zeit ändern. In Abbildung 56 ist das Ergebnis einer Messung über eine längere Zeit gezeigt. Die Messungen sind nicht auf Änderungen der Umgebungsparameter korrigiert. Trotzdem ist die Streuung der Messpunkte mit 1.9% klein.

Eine zweite, kleine TPC ist gebaut worden, die primär dazu verwendet werden soll, die Ladungsströme in der TPC genauer zu verstehen. Im Verstärkungsschritt werden viele positive Ionen produziert. Diese Ionen driften sehr langsam in Richtung auf die Kathode. Durch eine geeignete Wahl der Felder kann erreicht werden, dass nur ein kleiner Teil der Ionen tatsächlich zur Kathode driftet, ein großer Teil aber auf der GEM selbst absorbiert wird. Diese so genannte Unterdrückung des Ionenrückflusses ist ein wichtiger Bestandteil des Konzeptes der TPC bei TESLA, wurde aber bisher nur unzureichend quantitativ untersucht. Mit der kleinen Testkammer konnten erste Daten genommen werden (Abb. 57).



Abbildung 57: Prozentsatz der Ionen, die in das Driftvolumen der TPC zurückdriften, als Funktion der Spannung an der GEM.

In der Zukunft werden verstärkt Anstrengungen unternommen werden, einen optimalen Satz an Operationsparametern zu finden, so dass der Ionenrückfluss minimiert werden kann.

Das hadronische Kalorimeter

Als hadronisches Kalorimeter wird im TDR ein so genanntes "Tile"-Kalorimeter vorgeschlagen. Der Absorber ist aus Bleiplatten aufgebaut, die Energie wird mit Szintillatorplatten zwischen den Absorbern gemessen und ausgelesen. Das Licht aus den Szintillatoren wird mit Hilfe von Lichtleitern aus den Platten ausgekoppelt und zu den Photodetektoren geleitet. Das Prinzip solcher Tile-Kalorimeter ist gut bekannt und in vielen Experimenten erfolgreich angewendet worden.

Beim Vorschlag für den TESLA-Detektor ist die angestrebte Granularität allerdings deutlich größer als bisher. Es ist angestrebt, die Empfindlichkeit der Zellen so auszulegen, dass sie sowohl einzelne Teilchen als auch dichte Schauer gut erkennen. Gleichzeitig müssen die optischen Auslesekomponenten im sehr hohen Magnetfeld von 4 T funktionieren. Das Kalorimeter muss sehr kompakt gebaut werden, damit es komplett innerhalb der Spule angeordnet werden kann.

Aus diesen Gründen sind viele technische Entwicklungsarbeiten notwendig. Eine internationale Gruppe hat sich gebildet, mit Beiträgen vom DESY, aus der tschechischen Republik und aus Russland, die es sich zum Ziel gesetzt hat, ein optimiertes Design des Tile-Kalorimeters zu entwickeln. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Optimierung der Auskopplung des Lichtes aus den Szintillatorplatten und der Untersuchung verschiedener Photonen-Nachweisgeräte.

In Abbildung 58 ist die Lichtausbeute als Funktion des Krümmungsradius gezeigt, mit dem die Faser in die Szintillatorplatte eingelassen worden ist. Besonders bei den kleinsten Platten, die eine Größe von etwa 5×5 cm² haben, ist es wichtig, die Verluste so gering wie möglich zu halten.

In Zusammenarbeit mit Gruppen aus Frankreich und Russland wird eine Alternative zum Tile-Kalorimeter untersucht. Bei diesem so genannten Digitalen Kalorimeter wird pro Zelle nur die Information, ob ein Teilchen in der Zelle nachgewiesen wurde, gespeichert,



Abbildung 58: Lichtausbeute der Szintillatorplatten als Funktion des Krümmungsradius der Auslesefaser.

die Höhe der deponierten Energie wird nicht gemessen. Wenn die einzelnen Zellen ausreichend klein sind, so dass pro Teilchen viele Zellen ansprechen, lässt sich mit so einer Technologie eine ähnliche Auflösung wie mit einem konventionellen Kalorimeter erreichen. Allerdings gibt es viele technische Fragen, die gelöst werden müssen. Arbeiten an der Simulation eines solchen Kalorimeters haben begonnen.

Theoretische Physik

Sprecher: P. M. Zerwas

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

- Quantenchromodynamik bei HERA und in Hadron-Hadron-Prozessen,
- Flavour-Physik bei B-Mesonen,
- Physik bei TESLA,
- Neutrino-Physik und Kosmologie,
- Gittereichtheorien,
- Quantengravitation.

Eine besondere Rolle spielte dabei die Analyse des Physik-Potentials bei TESLA im Zusammenhang mit dem "Technical Design Report" für die Maschine. Ein übergreifendes Thema der HERA-Physik, B-Mesonen, e⁺e⁻-Physik, Kosmologie sowie Gittereichtheorien bildeten verschiedene Aspekte supersymmetrischer Theorien.

Quantenchromodynamik

Aus theoretischer Sicht besteht eine der wichtigsten Aufgaben von HERA und anderen Teilchenbeschleunigern darin, verschiedene Aspekte der Quantenchromodynamik (QCD) quantitativ zu testen und eine genaue Bestimmung ihrer Parameter zu ermöglichen. Die QCD ist eine Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung, die auf der nichtabelschen Eichgruppe SU(3) basiert und einen Bestandteil des heute allgemein anerkannten Standardmodells der Elementarteilchen bildet. Die QCD enthält als Materieteilchen sechs Arten von Quarks und als Austauschteilchen elektrisch neutrale Gluonen. Diese so genannten Partonen tragen Farbladungen, welche in beobachtbaren Bindungszuständen (Hadronen) stets neutralisiert sein müssen (Farbeinschlussprinzip). Die Kopplungsstärke der starken Wechselwirkung, $\alpha_s(\mu)$, hängt logarithmisch von der Energieskala μ des betrachteten Prozesses ab. Für hinreichend große Werte von μ ist $\alpha_s(\mu)$ klein genug für eine Störungsentwicklung, während im komplementären μ -Bereich nicht-störungstheoretische Methoden Anwendung finden.

Schwere Quarks

Die nichtrelativistische QCD (NRQCD) sagt die Existenz so genannter Farboktettprozesse in der Natur vorher, das heißt schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Die im Rahmen dieser Theorie vorhergesagten Wirkungsquerschnitte für die inklusive Charmonium-Erzeugung in tiefunelastischer ep-Streuung [DESY 01-196] bzw. in quasireeller yy-Streuung [DESY 01-202] stimmen gut mit entsprechenden Daten der H1-Kollaboration bei HERA bzw. der DELPHI-Kollaboration bei LEP2 überein, nachdem die relevanten nicht-störungstheoretischen Matrixelemente aus Tevatron-Daten der inklusiven Charmonium-Erzeugung bestimmt wurden. Im Rahmen dieser Theorie wurde auch die assoziierte Erzeugung von Charmonium mit zwei Hadronenjets in direkter Photoproduktion bei TESLA untersucht [DESY 01-039].

Der führende massenunterdrückte Zwei-Schleifen-Beitrag der Form $\alpha_s^3/m_q r^2$ zum Potential eines schweren Quark-Antiquark-Systems wurde mit Hilfe der Methode der Schwellenentwicklung im Rahmen der NRQCD analytisch berechnet. Dieser Beitrag rührt von der nichtabelschen Natur der QCD her und besitzt kein Gegenstück in der Quantenelektrodynamik. Seine quantitativen Auswirkungen auf die Top-Quark-Spektroskopie können mit TESLA getestet werden. Ferner wurde ein früheres Ergebnis für die Zwei-Schleifen-Korrektur der Ordnung α_s^2 zum statischen Potential bestätigt [DESY 01-075]. Für die Top-Quark-Paarproduktion in Hadron-Kollisionen pp, pp \rightarrow tt + X \rightarrow $\ell^+\ell'^-$ + X wurde die doppeltdifferentielle Winkelverteilung der Leptonen ℓ, ℓ' in nächstführender Ordnung (NLO) der QCD berechnet [DESY 01-040, 085]. Diese Winkelverteilung spiegelt die Korrelationen zwischen den Spins der Top-Quarks und -Antiquarks wider. Ihr Studium erlaubt somit einen detaillierten Einblick in die Wechselwirkungen, die Erzeugung und Zerfall der Top-Quarks bestimmen.

Strukturfunktionen

Für HERA wurde die Photoproduktion von führenden Neutronen in höherer Ordnung der QCD Störungstheorie berechnet [DESY 01-026]. Da in diesem Prozess effektiv Photonen an geladenen Pionen gestreut werden, erlauben Vergleiche dieser präzisen neuen Rechnung mit HERA-Messungen erstmals eine genaue Bestimmung der Gluon- und Seequarkdichten im Pion [hep-ph/0107011]. Die Pion-Struktur ist sowohl von theoretischer als auch von praktischer Bedeutung: Sie erlaubt die Überprüfung der chiralen und Isospin-Symmetrie und wird als Randbedingung für die Photon-Struktur benötigt. In älteren "Fixed-Target"-Experimenten konnte sie leider nur unzureichend bestimmt werden. Insbesondere die Gluondichte wurde bisher überschätzt.

Die HERA-Daten zur Proton-Strukturfunktion $F_2(x,Q^2)$ werden im Bereich kleiner Werte von x und Q^2 erfolgreich durch ein Saturierungsmodell beschrieben. Ein wesentlicher Aspekt dieses Modells, die Unitarisierung, wurde mit Hilfe der nichtlinearen Kovchegov-Gleichung untersucht [DESY 01-172]. Auch auf dem Gebiet der polarisierten Elektron-Proton-Streuung bei kleinen Werten von x wurde ein wesentlicher Fortschritt durch die Berechnung beider Strukturfunktionen $g_1(x,Q^2)$ und $g_2(x,Q^2)$ erzielt [DESY 01-198].

Auf dem Gebiet der BFKL-Physik lag der Forschungsschwerpunkt auf der Berechnung der Korrekturen höherer Ordnung zum so genannten Impakt-Faktor des Photons. Insbesondere wurden die reellen Strahlungskorrekturen vollständig berechnet, und es wurde gezeigt, dass das Bild von der Wellenfunktion des Photons seine Richtigkeit behält [DESY 01-102]. Es wurde auch die Berechnung der Korrekturen zur Vorwärtsjet-Erzeugung bei HERA in Angriff genommen. Erste Ergebnisse für den Quark-initiierten Jetvertex wurden veröffentlicht [DESY 01-221]. Diese beiden Ergebnisse werden genaue Tests der BFKL-Hypothese bei HERA, Tevatron, LHC und TESLA gestatten.

Kürzlich ist neues Interesse am Odderon, dem Partner des Pomerons mit den Quantenzahlen C = P = -1, aufgekommen. Die diffraktive η_c -Erzeugung ist hierbei ein besonders interessanter Prozess. Für diesen wurde eine Vorhersage auf der Grundlage der störungstheoretischen Odderon-Lösung gemacht [DESY 01-020].

QCD-Modelle

Ein populäres Modell zur Beschreibung des nichtstörungstheoretischen Niederenergie-Anteils von Prozessen der starken Wechselwirkung besteht darin, $\alpha_s(\mu)$ in das hadronische Regime hinein zu extrapolieren. Wenn diese kühne Idee richtig ist, dann besitzt das Partonbild einen erstaunlich weiten Geltungsbereich in Bezug auf vorhandene Daten. Andererseits könnte die Messung eines Mittelwerts von $\alpha_s(\mu)$ bei niedrigen Energien einen ersten Schritt hin zum vollständigen Verständnis der QCD bedeuten. HERA eignet sich hervorragend zur Überprüfung dieser Idee. Während der letzten fünf Jahre wurden auf dem Parton-Niveau so genannte "Event-Shape"-Observable berechnet, die eine pauschale Beschreibung der beobachteten Hadronjets liefern. Zur Berücksichtigung der Hadronisierung wurde das oben genannte Modell mit universellem $\alpha_s(\mu)$ verwendet. Auf diese Weise wurden verschiedene Event-Shape-Observable eingehend untersucht. In den meisten Fällen konnte eine hervorragende Beschreibung der experimentellen Daten erzielt werden [DESY 01-160]. Darüber hinaus wurden neue Event-Shape-Observable konstruiert, welche die Abstrahlung von zwei Hadronjets einbeziehen [hep-ph/0110384]. Entsprechende Messungen bei HERA werden mit Spannung erwartet.

Ein verbessertes Verständnis der nicht-störungstheoretischen QCD wurde auch durch die kürzlich entwickelten Modelle der weichen Farbwechselwirkung erlangt. Diese beruhen auf einer Variation der Farbstringfeldtopologien und liefern eine einheitliche Beschreibung verschiedener Endzustände in hochenergetischen Wechselwirkungen. Die spektakulären HERA-Ereignisse mit einer Rapiditätslücke können auf einfache Weise beschrieben werden, indem man in den Standard-Ereignisgenerator LEPTO ein entsprechendes einparametriges Modell einbaut. Die Anwendung des gleichen Modells mit dem PYTHIA Generator auf $p\bar{p}$ -Wechselwirkungen liefert eine gute Beschreibung der Tevatron-Daten zur Erzeugung von W-Bosonen, Bottom-Quarks und Hadronjets in Ereignissen mit einer oder zwei Rapiditätslücken [DESY 01-076]. Ferner fand man, dass diese Modelle auch Fixed-Target- und Collider-Daten der Charmonium-Erzeugung beschreiben [hep-ph/0111379]. Diese verschiedenartigen Effekte der nicht-störungstheoretischen QCD besitzen daher möglicherweise einen gemeinsamen Ursprung.

Solche Modelle sind jedoch nicht in der Lage, die beobachteten Rapiditätslücken zwischen zwei Hadronjets mit großen Transversalimpulsen zu erklären. Andererseits kann der große Impulstransfer über die Rapiditätslücke beschrieben werden durch den Austausch eines gluonischen Farbsingulett-Systems im Rahmen des BFKL-Modells, welches auf der störungstheoretischen QCD beruht. Um solche Daten, etwa vom Tevatron, richtig zu beschreiben, müssen auch nichtführende Korrekturen und das Laufen von $\alpha_s(\mu)$ berücksichtigt werden [hep-ph/0111090]. Eine entsprechende Untersuchung von Rapiditätslücken zwischen Hadronjets bei HERA wird durchgeführt.

Instanton-induzierte Prozesse

Vielversprechende Ansätze im Hinblick auf ein Verständnis nicht-störungstheoretischer Phänomene in der QCD beruhen auf einem vermutlich engen Zusammenhang zwischen der Struktur des euklidischen QCD-Vakuums und spezifischen Streuprozessen. Ein wichtiges Beispiel sind Instantonen als nichtstörungstheoretische, topologisch nichttriviale Fluktuationen der Gluonfelder, mit einer mittleren Ausdehnung von etwa 0.5 fm.

Kleine Instantonen induzieren charakteristische, harte Streuprozesse, die in der gewöhnlichen störungstheoretischen QCD verboten sind, jedoch im Rahmen der Instanton-Störungstheorie berechnet werden konnten [DESY 01-125]. Dabei wurde erkannt, dass die tiefunelastische Streuung bei HERA eine einzigartige Möglichkeit bietet, diese grundlegenden QCD-Prozesse erstmalig nachzuweisen. In der Tat fand eine Suche der H1-Kollaboration einen allerdings noch nicht schlüssigen Überschuss in den Daten, ermutigend nahe an den theoretischen Voraussagen. In engem Dialog mit H1-Experimentalphysikern werden verbesserte Suchstrategien erarbeitet [DESY 00-172].

Zwei neuere Projekte betreffen die Rolle größerer Instantonen sowohl im QCD-Vakuum als auch in hochenergetischen diffraktiven Streuprozessen. In diesem Bereich größerer Abstände sind die Hinweise von Gittersimulationen unverzichtbar. So zeigen Gitterdaten für die Verteilung der Instantongröße p eine praktisch perfekte Inversionssymmetrie unter $\rho \rightarrow 1/\rho$. Sie wird als Relikt der wohlbekannten konformen Invarianz des gesamten Instanton-Sektors auf dem klassischen Niveau interpretiert [DESY 01-125]. In der Tat wird durch eine konforme Koordinateninversion $x_{\mu} \rightarrow x_{\mu}/x^2$ das klassische Eichfeld eines Instantons der Größe p in das eines (Anti-)Instantons der Größe $\propto 1/\rho$ transformiert. Da durch eine konforme Inversion die Physik bei kleinen Abständen zu der bei großen Abständen in Beziehung gesetzt wird, sind mögliche Konsequenzen für die nicht-störungstheoretische QCD im allgemeinen von großem Interesse.

In einem weiteren Projekt wurde der bereits bekannte Ein-Instanton-Beitrag zur γ^* N-Streuung in das bei HERA populäre Farbdipolbild übersetzt. Neben der transversalen Ausdehnung $|\vec{r}|$ des am Nukleon streuenden qq̄-Dipols kommt nun eine weitere Skala ins Spiel, die effektive Instantongröße $\rho_{eff}(Q)$. Das Ergebnis ist ein Verlust der Farbtransparenz und ein konstanter Dipol-Wirkungsquerschnitt schon bei kleinen Werten von \vec{r}^2 [DESY 01-125].

B-Mesonen

Das Studium CP-verletzender Effekte in B-Meson-Zerfällen erlaubt eine strenge Überprüfung der Beschreibung der CP-Verletzung durch das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung und ist eines der gegenwärtig spannendsten Gebiete der Teilchenphysik. Eine Schlüsselrolle kommt hierbei dem Unitaritätsdreieck der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix zu, welches aus der Unitarität dieser Matrix folgt; die "on-mass-shell" Renormierung der CKM Matrix wurde kürzlich diskutiert [DESY 01-071]. Das zentrale Ziel der kommenden Jahre ist die Überbestimmung dieses Dreiecks durch die unabhängige Messung seiner Seiten und Winkel α , β und γ , wobei die Hoffnung besteht, durch den Einfluss "neuer" Physik widersprüchliche Resultate zu erhalten.

Im Sommer des Jahres 2001 konnte an den B-Fabriken am SLAC und KEK erstmals die CP-Verletzung im B-System mit Hilfe des "goldenen" Zerfalls $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ nachgewiesen werden, dessen mischungs-induzierte CP-Asymmetrie $a_{\psi K_S}$ eine theoretisch saubere Bestimmung der Größe sin 2ß erlaubt. Für eine systematische, modellunabhängige Analyse möglicher Effekte neuer Physik ist es wichtig, auch die geladenen Zerfälle $B^{\pm} \rightarrow J/\psi K^{\pm}$ zu messen. Es lassen sich dann geeignete Observable einführen, die nicht nur Hinweise auf neue Physik, sondern auch Einblicke in die Hadrondynamik der Zerfälle $B \rightarrow J/\psi K$ geben können [DESY 01-006]. Analoge Studien können auch für das System $B \rightarrow \phi K$ durchgeführt werden, das von virtuellen Schleifenbeiträgen beherrscht wird und daher besonders sensitiv auf den Einfluss neuer Physik reagiert [DESY 01-030]. So kann man beispielsweise durch komplexe Flavour-Kopplungen im Squark-Sektor supersymmetrischer Theorien Abweichungen der mischungsinduzierten CP-Asymmetrie im Zerfall $B^0 \rightarrow$ ϕK_S von der Standardmodell-Erwartung von bis zu O(20%) erhalten [DESY 01-128].

Darüber hinaus gibt es vielfältige andere mögliche Signaturen supersymmetrischer Modelle in B-Zerfällen [DESY 01-224]. Ein besonders wichtiges Element in der Überprüfung der Standardmodell-Beschreibung der CP-Verletzung ist auch die Bestimmung des Winkels γ , für die die Zerfälle $B \rightarrow \pi K$ und das $B_d^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $B_s^0 \rightarrow K^+K^-$ System sehr vielversprechend sind [DESY 01-162].

Eine Brücke zwischen der CP-Verletzung in den Bund K-Systemen wird durch die seltenen Zerfälle $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \overline{\nu}$ und $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ hergestellt, deren Verzweigungsverhältnisse in Modellen mit "minimaler Flavour-Verletzung" (MFV) bemerkenswerte Korrelationen mit $a_{\psi K_S}$ zeigen [DESY 01-054]. Durch Einführung zusätzlicher flavour-ändernder Strukturen, deren Ursprung jenseits der CKM Matrix liegt, lassen sich interessante Erweiterungen MFV-supersymmetrischer Modelle konstruieren [DESY 01-059].

Neben CP-Asymmetrien in B-Zerfällen, wie zum Beispiel $a_{\psi K_S}$, stellen radiative $b \rightarrow d\gamma$ Übergänge sehr sensitive Sonden für solch neue flavour-ändernde

Kopplungen dar, insbesondere durch das Verhältnis BR(B⁰ $\rightarrow \rho^{0}\gamma$)/BR(B⁰ $\rightarrow K^{*}\gamma$), das isospinverletzende Verhältnis BR(B^{\pm} $\rightarrow \rho^{\pm}\gamma$)/BR(B⁰ $\rightarrow \rho^{0}\gamma$) und die CP-Asymmetrie in B[±] $\rightarrow \rho^{\pm}\gamma$ Zerfällen. In der theoretischen Beschreibung exklusiver Übergänge B $\rightarrow K^{*}\gamma$ und B $\rightarrow \rho\gamma$ konnten kürzlich wichtige Fortschritte erzielt werden, die eine Berechnung der entsprechenden Verzweigungsverhältnisse in nächstführender Ordnung in der starken Kopplung α_{s} und der Quarkmasse erlauben [DESY 01-068]. Darüber hinaus wurden die Zerfälle B $\rightarrow K^{**}\gamma$ im Rahmen eines QCD-Summenregel-Formalismus auf dem Lichtkegel untersucht [DESY 01-138].

Eine herausragende Rolle für die Suche nach neuer Physik spielen die Zerfälle $B \rightarrow (X_s, K, K^*)\ell^+\ell^-$, deren Verzweigungsverhältnisse genauer berechnet wurden. Unter Verwendung dieser Resultate und der gegenwärtig verfügbaren Messungen der $B \rightarrow X_s \gamma$ und $B \rightarrow K\ell^+\ell^-$ Verzweigungsverhältnisse und der oberen Grenzen für die Zerfälle $B \rightarrow (X_s, K^*)\ell^+\ell^-$ konnten Einschränkungen an die Wilson-Koeffizienten der entsprechenden effektiven Niederenergie-Theorie gewonnen werden, die mit den Vorhersagen des Standardmodells und einigen supersymmetrischen Szenarien konsistent sind [DESY 01-217].

Physik bei TESLA

Das Physik-Potential von TESLA ist für den Higgs-Mechanismus und die elektroschwache Wechselwirkung sowie für physikalische Bereiche jenseits des Standardmodells, insbesonders die Supersymmetrie, untersucht worden. Diese Analysen bildeten die theoretische Grundlage für die entsprechenden Kapitel im Technical Design Report von TESLA [DESY 01-011], den die DESY Theorie-Gruppe maßgebend mitformuliert hat. Diese Studien bildeten auch eine wesentliche Grundlage für die Diskussionen und für die Ergebnisse, die auf dem amerikanischen Workshop "Snowmass 2001 - The Future of Particle Physics" erzielt worden waren. Sie führten zum Konsens darüber, dass es die vordringlichste Aufgabe der Hochenergiephysik sei, den Bau eines e⁺e⁻-Linear-Colliders im TeV-Energiebereich zu realisieren.

Die Entdeckung neuer Phänomene wie auch Präzisionsmessungen im Standardmodell und im Bereich jenseits des Modells sind der Kernpunkt des Physik-Programmes an einem Linear-Collider.

Strahl-Polarisation

Eine hohe Polarisation des Elektronenstrahls reicht im allgemeinen aus, die Grundelemente das Physik-Programms bei TESLA zu überdecken. Jedoch verbessert die simultane Polarisation des Positronenstrahls nicht nur die Unterdrückung von Untergrundprozessen, sondern sie ist auch für die Analyse einiger bedeutender neuer physikalischer Phänomene und für einige Präzisionsmessungen von Standardmodell-Prozessen unabdingbar [DESY 00-178]. Im TESLA-Design sollen ein Elektron-Polarisationsgrad von 80% und ein Positron-Polarisationsgrad von bis zu 60% realisiert werden.

W-Boson-Physik

Die W-Paarerzeugung an e^+e^- -Beschleunigern liefert einen wichtigen Test des Standardmodells der elektroschwachen Wechselwirkung. Abbildung 59 stellt die Messwerte von LEP für den totalen Streuquerschnitt σ^{WW} den Präzisionsrechnungen der Monte Carlo-Eventgeneratoren RACOONWW und YFSWW gegenüber.

Die Messgenauigkeit für den Wirkungsquerschnitt von etwa 1%, die an zukünftigen Beschleunigern wie TESLA noch übertroffen werden kann, erfordert eine sorgfältige Kontrolle von Effekten höherer Ordnung der Störungstheorie (Strahlungskorrekturen) sowie die Einbeziehung des W-Zerfalls [DESY 01-003].

Die WW-Produktion erlaubt ferner eine genaue Messung der W-Masse sowie eine direkte Untersuchung der Eichboson-Selbstwechselwirkung. Die theoretische Unsicherheit in der Einschränkung der 3-Eichboson-Kopplungen bei LEP wurde sorgfältig ausgearbeitet [DESY 01-184] und die Erweiterung von RACOONWW zur Analyse von anomalen 4-Eichboson-Kopplungen in WWγ-Produktion beschrieben [DESY 01-042].

An Hadron-Beschleunigern wird die W-Masse über die W-Produktion in der Quark-Antiquark Annihilation bestimmt. Der Bericht [DESY 01-121] enthält die bislang



Abbildung 59: *W-Paarproduktion in der* e^+e^- *-Annihilation.*

umfassendste Berechnung der relevanten Strahlungskorrekturen, die auch in der Suche nach neuer Physik über hochenergetische W-Bosonen am LHC wichtig sind.

Higgs-Physik

Nach der LEP-Ära in der Hochenergie-Physik konzentrieren sich nun die Vorbereitungen für die Suche nach Higgs-Teilchen auf die Hadronen-Maschinen Tevatron am Fermilab und LHC am CERN, sowie auf zukünftige Elektron-Positron Linear-Collider [DESY 01-203].

Die Suche nach Higgs-Bosonen am Tevatron ist außerordentlich schwierig, da die Signale aus einer großen Zahl von Untergrund-Ereignissen isoliert werden müssen. Einer dieser Kanäle ist die Abstrahlung von Higgs-Bosonen von schweren Top- und Bottom-Quarks, die beispielsweise in der Gluon-Fusion bei Proton-Proton Stößen erzeugt werden. Zwar ist die Ereignisrate in diesem Kanal gering, doch sind die Signaturen sehr klar. Theoretisch konzeptionell befriedigende Vorhersagen mit experimentell wünschenswerter Genauigkeit sind für diesen Kanal in [DESY 01-077] erreicht worden. Rechnungen höherer Ordnung in der QCD haben zu



Abbildung 60: Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes in Higgs-Strahlung vom Spin des Higgs-Bosons.

einer beeindruckenden Stabilisierung der Analyse geführt, so dass die Suche nach Higgs-Bosonen in diesem Kanal theoretisch gut fundiert ist.

Wegen hoher Untergrundkontamination ist die Suche nach schweren Higgs-Bosonen in supersymmetrischen Szenarien am LHC in einem "blinden Keil" des Parameterraumes für Higgs-Massen jenseits von 200 GeV und mittlere Mischungswinkel nicht möglich. Resonanzformation der skalaren und pseudoskalaren Higgs-Bosonen in Photon-Photon Stößen, erzeugt im Compton-Mode von TESLA, kann jedoch diese Problemzone überdecken [DESY 00-192].

Wenn Higgs-Bosonen gefunden worden sind, wird es eine zentrale Aufgabe sein, ihre Eigenschaften detailliert zu bestimmen, unter anderem die Spinund Paritäts-Quantenzahlen. Diese Aufgabe kann in der Higgs-Strahlung der Teilchen an e^+e^- -Linear-Collidern gelöst werden [DESY 01-010, 192]. Die Kombination von Schwelleneffekten in der Anregungskurve mit Winkelkorrelationen wird es erlauben, die externen Quantenzahlen des Higgs-Bosons in der Standard-Theorie modellunabhängig experimentell zu bestimmen (Abb. 60).

Von gleicher Bedeutung ist die Messung der Kopplungen von Higgs-Bosonen untereinander. Dies ist ein weites Feld in supersymmetrischen Theorien, in denen der Higgs-Sektor von außerordentlich komplexer Natur ist. In e^+e^- -Linear-Collidern wie auch teilweise im LHC können diese Kopplungen in Teilbereichen des Parameterraums gemessen werden [DESY 01-015]. Dies sind essenzielle Experimente, da die elektroschwache Symmetriebrechung sui generis durch die Selbst-Kopplungen bewirkt wird.

Supersymmetrie

Präzisionsmessungen der Masse des W-Bosons und der Vergleich mit der theoretischen Vorhersage wie auch die Vereinigung der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Kraft bei sehr hohen Energien deuten auf die Existenz von Supersymmetrie (SUSY) hin. Hierbei wird jedem Standardmodell-Teilchen ein supersymmetrischer Partner zugeordnet, der sich um eine halbe Einheit in der Spin-Quantenzahl unterscheidet. Da die Teilchen und ihre Superpartner nicht dieselbe Masse besitzen, muss diese Symmetrie bei niedrigen Energien verletzt sein, was zu einer Vielzahl von unbekannten Parametern in der Theorie führt. Experimente an zukünftigen Collidern müssen diese unbekannten Parameter bestimmen, so dass die Struktur der zugrunde liegenden supersymmetrischen Theorie eindeutig rekonstruiert werden kann.

Hierzu gehört es, zu beweisen, dass die Eichkopplungen im Standardmodell identisch zu denen sind, die zwischen den entsprechenden supersymmetrischen Partnern von Quarks und Leptonen wirken [DESY 01-088]. Ebenfalls muss die Äquivalenz der Quantenzahlen der Standardmodell-Teilchen und ihrer SUSY-Partner überprüft werden. So sollten die skalaren Partner von Elektronen mit denselben chiralen Quantenzahlen wie diejenigen der Elektronen assoziiert sein. Dies lässt sich nur an einem Linear-Collider zeigen, der gleichzeitig polarisierte Elektronen- und Positronenstrahlen zur Verfügung stellt [DESY 00-178, 01-173].

Die Präzisionsmessungen bei TESLA werden es auch erlauben, die Massen der neuen Teilchen mit so hoher Genauigkeit zu bestimmen, dass selbst in den theoretischen Vorhersagen Effekte der endlichen Lebensdauern der neuen Teilchen berücksichtigt werden müssen [DESY 01-066].

Durch die Brechung der Supersymmetrie mischen die SUSY-Partner der geladenen und neutralen Eich- und Higgs-Bosonen untereinander. Die experimentelle Be-
stimmung der Mischungsanteile gibt direkten Aufschluss über die Struktur des supersymmetrischen Modells. Für die Rekonstruktion dieser Mischungsanteile ist ein Linear-Collider durch Präzisionsmessungen mit Hilfe polarisierter Strahlen besonders geeignet [DESY 00-098, 01-088], wobei die Auswertung von Winkelund Energieverteilungen charakteristisch für den zugrunde liegenden Dirac- bzw. Majorana-Charakter der supersymmetrischen Fermionen ist [DESY 01-117].

Teilchenphysik am XFEL

Der Freie-Elektronen Laser im Röntgenbereich (XFEL) bietet dank seiner hohen Leistungsdichte neue Möglichkeiten für die Grundlagenforschung in der Teilchenphysik [DESY 01-213].

So kann man sich die mögliche hohe Leistungsdichte am Fokus eines XFEL zunutze machen, um das Vakuum gewissermaßen "zum Kochen" zu bringen und zum ersten Mal die von der Quantenelektrodynamik vorhergesagte spontane e⁺e⁻-Paarerzeugung in einem sehr starken äußeren elektrischen Feld zu beobachten [DESY 01-024]. Dieser fundamentale Prozess hat viele Analogien in der kontemporären Physik, von der Evaporation von Schwarzen Löchern bis zur Teilchenproduktion in hadronischen Kollisionen. Eine weitere interessante Anwendung eines XFELs wären die Produktion und der Nachweis von Axionen, hypothetischen leichten Teilchen, die im Rahmen von Lösungen des so genannten "starken CP-Problems" postuliert wurden [DESY 01-213].

Neutrino-Physik und Kosmologie

Die Urknall-Kosmologie sagt die Existenz eines Hintergrund-Gases freier Photonen und Neutrinos voraus. Die gemessene kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung bestätigt die Anwendbarkeit der Standard-Kosmologie zurück bis zur Ära der Photon-Entkopplung, etwa hunderttausend Jahre nach dem Urknall. Die Hintergrund-Neutrinos andererseits entkoppelten schon etwa eine Sekunde nach dem Urknall. Ihr Nachweis, mit einer vorhergesagten mittleren Dichte von etwa 56 Neutrinos pro Kubikzentimeter und Neutrinospezies, würde daher ein neues Fenster auf das frühe Universum öffnen. Der direkte Nachweis ist jedoch bis heute auf Grund der Schwäche der Neutrino-Wechselwirkungen nicht gelungen. In letzter Zeit wurde eine Möglichkeit des indirekten Nachweises diskutiert. Er basiert auf so genannten Z-Bursts, welche aus der resonanten Vernichtung von höchstenergetischen kosmischen Neutrinos mit kosmischen Hintergrund-Antineutrinos in Z-Bosonen resultieren.

Auf der Z-Resonanz ist die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit um mehrere Größenordnungen erhöht. Interessanterweise sind die Resonanzenergien im Ruhesystem der Hintergrund-Neutrinos, $E_{v_i}^{\text{Res}} =$ $4 \cdot 10^{21} \text{ eV/m}_{v_i}$ [eV], von der Größenordung der höchstenergetischen, in Luftschauerexperimenten beobachteten kosmischen Strahlung, falls die Neutrinos eine Masse von $m_{\nu_i} = 0.1 - 1$ eV haben. Unter der Annahme, dass die höchstenergetische kosmische Strahlung bei Energien oberhalb von 4 · 10¹⁹ eV hauptsächlich Protonen aus Z-Bursts sind, und dass genügend ultrahochenergetische kosmische Neutrinos vorhanden sind, lässt sich die erforderliche Masse des schwersten Neutrinos zu $m_{\nu_3} = 0.26^{+0.20(0.50)}_{-0.14(0.22)}$ eV bestimmen [DESY 01-048, 070, 189]. Diese Vorhersagen lassen sich durch weitere Untersuchungen im Labor, in der Kosmologie, an Neutrinoteleskopen und an Luftschauerexperimenten testen.

Massive Neutrinos können entweder Dirac- oder Majorana-Teilchen sein; im letzteren Fall vermitteln sie die Leptonzahl-Verletzung und können eine charakteristische Signatur in Beschleuniger-Experimenten und in seltenen Mesonen-Zerfällen durch die Erzeugung von gleichgeladenen Leptonen hinterlassen. Solche Ereignisse mit der Erzeugung von Myonen oder Tau-Leptonen können am LHC beobachtet werden, wenn die schweren Majorana-Neutrinos leichter als 5 TeV sind; für Ereignisse mit Elektronen dagegen liegt der Wirkungsquerschnitt unter der LHC-Sensitivität wegen der Schranken aus dem neutrinolosen doppelten β -Zerfall [DESY 01-051, 207].

Majorana-Neutrinos sind auch die Basis für Modelle der Baryogenese durch die Erzeugung einer Lepton-Asymmetrie in dem Zerfall schwerer rechtshändiger Neutrinos, der so genannten Leptogenese [DESY 01-101]. In solchen Modellen wird die Baryon-Asymmetrie normalerweise unter der Voraussetzung des thermischen Gleichgewichts und ohne Berücksichtigung der chemischen Potentiale der StandardmodellTeilchen berechnet. Effekte dieser chemischen Potentiale sind eine größere Diffusion und eine Reduzierung der Baryon-Asymmetrie [DESY 01-046].

Inflation und dunkle Materie

Im Berichtsjahr gab es sehr interessante neue Resultate in der Messung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. Die Beobachtungen der Boomerang- und Maxima-Experimente und der DASI- und CBI-Interferometer haben mit hoher Präzision gezeigt, dass unser Universum euklidisch ist, entsprechend der Vorhersage von Inflationsmodellen [DESY 01-195]. Leider ist es noch nicht möglich, zwischen den verschiedenen Modellen zu entscheiden. Sehr interessant sind die Modelle der Hybrid-Inflation in supersymmetrischen Theorien, wo die inflationäre Dynamik von der Supersymmetriebrechung bestimmt wird [DESY 00-082]. In diesem Fall kann der Phasenübergang am Ende der Inflation und die Entstehung von kosmologischen Defekten analytisch beschrieben werden [DESY 01-019]. In supersymmetrischen Inflationsmodellen mit niedriger Skala kann außerdem Leptogenese durch den Affleck-Dine Mechanismus realisiert werden; um die beobachtete Baryon-Asymmetrie zu erhalten, muss das leichteste Neutrino eine Masse von 10^{-4} eV haben [DESY 01-142].

Im Fall niedriger Temperatur nach der Inflation, das heißt unterhalb von 10⁶ GeV, könnte die dunkle Materie des Universums aus exotischen Teilchen, Axinos, den Superpartnern von Axionen, bestehen. Solche Teilchen haben sehr schwache Kopplungen an Materie und würden nie das thermische Gleichgewicht erreichen, aber in genügender Anzahl durch Neutralino-Zerfälle und andere thermische Streuprozesse erzeugt werden [DESY 00-193].

Die Supernova-Daten über die Beschleunigung der Ausdehnung des Universums deuten auf die Anwesenheit einer homogenen Komponente der Energiedichte hin; dies könnte entweder eine kosmologische Konstante oder die potentielle Energie eines skalaren Feldes sein (Quintessenz). Durch die Messung der Zustandsgleichung dieser Energiekomponente können diese zwei Möglichkeiten unterschieden werden [DESY 01-147, 165].

Schon seit geraumer Zeit wurde spekuliert, dass bei der Kollision von Teilchen mit Schwerpunktsenergien oberhalb der Planckskala $M_{pl} = 10^{19}$ GeV (Mini-) Schwarze Löcher produziert werden. Diese wegen der hohen Energien experimentell nicht nachprüfbare Möglichkeit rückte in letzter Zeit in Reichweite im Kontext von Theorien jenseits des Standardmodells, welche mehr als vier Raumzeit-Dimensionen und eine neue fundamentale Planckskala $M_D \gtrsim 1 \, \text{TeV}$ postulieren. Am LHC bei CERN mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV könnte die Produktion und Evaporation von Schwarzen Löchern im Detail untersucht werden. Aber schon vor der Inbetriebnahme des LHC kann in Luftschauerexperimenten, insbesondere am Pierre Auger-Observatorium in Argentinien, nach den Signaturen der Produktion von Schwarzen Löchern in der Kollision von ultrahochenergetischen kosmischen Neutrinos mit Nukleonen in der Atmosphäre gesucht werden. Je nach Menge der ultrahochenergetischen kosmischen Neutrinos lassen sich eventuell die ersten Zeichen der Produktion von Schwarzen Löchern bei Auger noch vor dem Start von LHC beobachten. Des Weiteren können schon jetzt sinnvolle Einschränkungen an die Produktion von Schwarzen Löchern aus der Tatsache der Nichtbeobachtung von horizontalen Luftschauern durch die Fly's Eye-Collaboration in Utah (USA) angegeben werden [DESY 01-182].

Vereinheitlichte Theorien

Im Zusammenhang mit den neuen experimentellen Hinweisen auf Neutrinomassen und -mischungen sind vereinheitlichte Theorien mit der Eichgruppe SO(10) von aktuellem Interesse. Die Brechung dieser Symmetrie auf die Standardmodell-Eichgruppe kann auf einfache Weise mit Hilfe einer "Orbifold-Kompaktifizierung" realisiert werden, ausgehend von einer Theorie in sechs Raum-Zeit-Dimensionen [DESY 01-106]. SO(10)-Relationen zwischen Yukawa-Kopplungen sowie der "Seesaw"-Mechanismus verknüpfen Neutrino-Eigenschaften mit Quarkmassen und -mischungen. Dabei führen große Neutrinomischungen auf eine starke Einschränkung der freien Parameter. Dies führt zu Vorhersagen für CP-Verletzung in Neutrino-Oszillationen, den neutrinolosen doppelten β -Zerfall und die kosmologische Baryon-Asymmetrie [DESY 01-115].

Von aktuellem Interesse sind Erweiterungen des Standardmodells mit einer weiteren Raum-Dimension und Kaluza-Klein-Anregungen von Elementarteilchen mit Massen im TeV-Bereich. Eine Analyse im Rahmen des Randall-Sundrum-Modells zeigt dabei, dass elektroschwache Präzisionstests zu einer unteren Massenschranke für angeregte W- und Z-Bosonen von etwa 10 TeV führen [DESY 01-201].

Gittereichtheorien

Die Gitterformulierung der Quantenfeldtheorie ermöglicht es, verschiedene Parameter der starken Wechselwirkung von Quarks und Gluonen, die im Rahmen der Quantenchromodynamik beschrieben wird, in numerischen Simulationen zu berechnen. Wichtige Beispiele der berechneten Parameter sind Hadron-Massen, hadronische Matrixelemente der elektroschwachen Ströme, die starke Kopplungskonstante, die Quarkmassen, die Parameter der niederenergetischen chiralen Lagrangefunktion und die thermodynamischen Eigenschaften der Hadron-Materie bei hohen Temperaturen oder hohen Baryondichten.

Die numerischen Monte Carlo-Simulationen werden auf leistungsfähigen Computern durchgeführt, die die Parallelverarbeitung auf vielen Prozessoren ermöglichen. Für diese Arbeit stehen im NIC, DESY-Zeuthen, APE-Spezialrechner und im NIC, Jülich, die CRAY-T3E zur Verfügung. Seit kurzem sind auch in DESY-Hamburg PC-Cluster zu diesem Zweck im Einsatz.

Quantenchromodynamik

Die Theoriegruppe in Hamburg hat sich in letzter Zeit mit der Frage beschäftigt, ob man die Polarisationseffekte des Strange-Quarks in die Monte Carlo-Simulationen einbauen könnte. Bis jetzt wurden die meisten Rechnungen nur mit Berücksichtigung des Upund Down-Quarks gemacht, weil der verwendete Simulationsalgorithmus nur eine gerade Anzahl von Quarks mit paarweise gleichen Massen behandeln konnte. Es wurde ein neuer, so genannter multi-bosonischer Algorithmus entwickelt und getestet, der für eine beliebige Zahl von Quarks mit verschiedenen Massen anwendbar ist [DESY 01-159]. Die Bestimmung der Kopplungs-Koeffizienten der Gasser-Leutwylerschen chiralen Lagrange-Funktion mit Hilfe dieses Algorithmus wurde vorbereitet. In einem weiteren Projekt wurden die Eigenschaften von Gitterfermionen mit exakter chiraler Symmetrie, so genannte Ginsparg-Wilson-Fermionen, untersucht. Diese Formulierung, obgleich numerisch wesentlich aufwendiger als herkömmliche Diskretisierungen, eignet sich besonders zum Studium der spontanen chiralen Symmetriebrechung in der QCD. Hierbei wird typischerweise untersucht, ob sich ein Quark-Kondensat bildet. Ein wesentlicher Bestandteil numerischer Rechnungen ist die Renormierung der für das Kondensat relevanten Operatoren in der Gitter-Theorie. Es konnte gezeigt werden, dass eine nicht-perturbative Renormierung des Kondensats für Ginsparg-Wilson-Fermionen möglich ist [DESY 01-083]. Ein wesentliches Element hierbei ist die Anpassung der chiral-symmetrischen Gitterregularisierung an eine intermediäre Wilson-Regularisierung. Die Rechnung ist so angelegt, dass jeder Bezug auf das intermediäre Schema im Endresultat herausgekürzt wird. Durch diese Methode kann ein wesentlicher systematischer Effekt in Gitterrechnungen mit Ginsparg-Wilson-Fermionen unter Kontrolle gebracht werden. Numerische Resultate für das renormierte Kondensat sowie für die Masse des Strange-Quarks und die Pion-Zerfallskonstante liefern Hinweise, dass der Einfluss von Gitterartefakten für Ginsparg-Wilson-Fermionen recht klein ist [DESY 01-174].

Eigenschaften der Materie bei hohen Quark-Dichten

In der Quantenchromodynamik wird erwartet, dass bei sehr hohen Baryondichten (oberhalb der normalen Dichte von Atomkernen oder Neutronensternen) die Materie nicht mehr aus Hadronen besteht, sondern sich am besten mit den elementaren Quark- und Gluon-Freiheitsgraden beschreiben lässt. Eine wesentliche Änderung im Vergleich zur Kernmaterie ist die Erscheinung von Diquark-Paar-Kondensaten. Dies kann zu interessanten Phänomenen wie Supraleitung oder Superfluidität führen, die für große Neutronensterne vorhergesagt werden.

Im Rahmen eines europäischen TMR-Projekts hat die DESY-Swansea-Kollaboration eine Modelluntersuchung der Diquark-Kondensation mit Quarks in der adjungierten Darstellung der SU(2)-Farbgruppe durchgeführt [DESY 01-139, 152]. Die erwartete Phasenübergangsstruktur als Folge der Diquark-Kondensation wurde bestätigt.

Außerdem wurde der Endpunkt der Phasenübergangslinie in der Ebene der Temperatur und Baryondichte bestimmt [DESY 01-044, 057].

Supersymmetrie-Brechung in der Yang-Mills-Theorie

Die supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells setzen die spontane Brechung der Supersymmetrie voraus. Zahlreiche Modelle für die Supersymmetrie-Brechung basieren auf den nichtstörungstheoretischen Eigenschaften der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie. Diese Theorie beschreibt die Wechselwirkung des Eichfelds mit einem masselosen Majorana-Fermionfeld in der adjungierten Darstellung [DESY 01-113, 214]. In der Gitter-Regularisierung wird die Supersymmetrie bei nichtverschwindender Gitterkonstante durch Gitterartefakte gebrochen. Eine konsistente Beschreibung setzt die Wiederherstellung der Supersymmetrie im Kontinuumslimes voraus.

In der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie mit SU(2)-Eichgruppe hat die DESY-Münster-Roma-Kollaboration die Ward-Takahashi-Identitäten der Supersymmetrie untersucht [DESY 01-141, 157, 158]. Die numerischen Resultate sind, innerhalb der statistischen und systematischen Fehler, konsistent mit der erwarteten Realisierung der Supersymmetrie im Kontinuumslimes.

Simulationsalgorithmen

Ein wichtiger Teil der Arbeit wurde der Entwicklung multi-bosonischer Simulationsalgorithmen gewidmet. Insbesondere die Möglichkeit der Simulation leichter Quarks wurde untersucht [DESY 01-148, 149, 187]. Die Zielsetzung ist, die Simulationen in einem Bereich kleiner Quarkmassen durchzuführen, wo mit Hilfe der chiralen Lagrangefunktion die Extrapolation zum physikalischen Punkt mit kontrollierten Fehlern möglich wird.

Die Gittereichtheorie hat sicher wesentlich dazu beigetragen, das Quark-Confinement als dynamische Eigenschaft der QCD plausibel zu machen. Es ist allerdings nicht so leicht, die Kräfte zwischen statischen Quarks bei Abständen größer als 1 f durch numerische Simulation genau zu bestimmen, weil in diesem Bereich das Verhältnis zwischen Signal und statistischem Fehler exponentiell abfällt. Aus diesem Grund war es unter anderem bisher nicht möglich, zweifelsfrei zu zeigen, dass sich zwischen den Quarks eine chromo-elektrische Flussröhre bildet, die bei hinreichend großen Distanzen durch eine effektive bosonische Stringtheorie beschrieben werden kann.

Ein neuer Simulationsalgorithmus, der durch hierarchische Mittelungen eine exponentielle Unterdrückung der statistischen Fluktuationen erreicht, könnte an dieser Stelle zu deutlichen Fortschritten führen. Zwar liegen noch keine physikalischen Ergebnisse vor, aber ausführliche Tests haben ergeben, dass die neue Methode gegenüber den traditionellen Verfahren um Größenordungen effizienter ist [hep-lat/0108014].

Gitter-QCD auf PCs

Für numerische Simulationen der Gitter-QCD werden heute zunehmend auf PC-Prozessoren basierende kommerzielle Parallelrechner eingesetzt. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung liegt darin, dass PC-Prozessoren im Bereich der Fließkomma-Arithmetik und der Speicherbandbreite inzwischen sehr hohe Leistungswerte erreichen [hep-lat/0110007]. Den bisher bevorzugten Spezialrechnern ist damit eine in Bezug auf das Preis-Leistungs-Verhältnis konkurrenzfähige und aus der Sicht der Programmierbarkeit attraktive Alternative erwachsen.

Quantengravitation

Eines der großen Probleme der Quantenfeldtheorie ist ihre Vereinbarkeit mit dem Lokalitätsprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die allgemein kovariante Formulierung der Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Raumzeiten, einschließlich der Renormierung, die in den letzten Jahren durchgeführt worden ist, ist im generischen Fall einer Raumzeit mit trivialer Symmetriegruppe nicht lokal in dem Sinne, dass globale Information über die Struktur der Raumzeit in die Konstruktion eingeht. Dies führt zu dem Problem, dass Renormierungsvorschriften an verschiedenen Raumzeitpunkten nicht miteinander verglichen werden können. Kürzlich wurde ein neues Paradigma für Quantenfeldtheorien auf Mannigfaltigkeiten vorgeschlagen: Quantenfeldtheorien werden danach simultan auf allen Raumzeiten einer geeigneten Klasse (beispielsweise global hyperbolisch) erklärt, so dass zu jeder Einbettung einer Raumzeit in eine andere ein Homomorphismus der zugehörigen Operatoralgebren gehört [mathph/0112041]. Mathematisch handelt es sich bei dieser Struktur um einen kovarianten Funktor zwischen der Kategorie der Raumzeiten und der der Operatoralgebren. Mit Hilfe dieses neuen Prinzips konnte die Renormierungsfreiheit auf endlich viele Parameter eingeschränkt werden [gr-qc/0111108]. Weiter konnte das Spin-Statistik-Theorem auf gekrümmten Raumzeiten bewiesen werden.

Andere Arbeiten beschäftigten sich mit Lokalitätseigenschaften von Quantenfeldtheorien auf dem Minkowski-Raum und dem klassischen Limes [DESY 01-002], der allgemeinen Beschreibung von Symmetrien in der störungstheoretischen Quantenfeldtheorie [hep-th/0111101], der Renormierungsgruppe, der Operatorproduktentwicklung und dem Energie-Impuls-Tensor. Zur Rolle der Zeit in der Quantentheorie wurde ein neuer Vorschlag gemacht, der es gestattet, die Wahrscheinlichkeiten für den Zeitpunkt eines Ereignisses zu berechnen [DESY 01-038].

Neben diesen Untersuchungen, bei denen eine kontinuierliche Raumzeit vorausgesetzt wird, wurden die Arbeiten an einer Ausdehnung der Konzepte der Quantenfeldtheorie auf eine nichtkommutative Raumzeit fortgesetzt. Diese Arbeiten sind motiviert durch die Vermutung, dass die Nichtkommutativität der Raumzeitkoordinaten eine approximative Beschreibung von Quanteneffekten der Gravitation gestattet. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Fragen des geeigneten Lokalitätsbegriffs, der Eichinvarianz, der Renormierbarkeit und der Unitarität.



Abbildung 61: Links: Schnitt durch das Betragsquadrat der dreidimensionalen Fouriertransformierten der Elektronendichte eines Makromoleküls. Rechts: wie links, jedoch für einen in allen drei Raumrichtungen fünf Elementarzellen großen Kristall des gleichen Makromoleküls der gleichen Orientierung. Die Intensität ist nach einer logarithmischen Farbskala aufgetragen.

Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB

Leiter: J.R. Schneider, DESY

Im Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASY-LAB wird die von Positronen bzw. Elektronen in den Speicherringen DORIS III und PETRA II emittierte Synchrotronstrahlung in vielfältiger Weise in Grundlagen- und anwendungsbezogener Forschung auf den Gebieten der Physik, Biologie, Chemie und Kristallographie, in den Material- und Geowissenschaften sowie der Medizin eingesetzt. Dabei wird das weite Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom sichtbaren Licht bis zum harten Röntgengebiet genutzt und ein Energiebereich von etwa 1 eV bis zu 300 keV überstrichen. Zusätzlich zum Betrieb der Nutzereinrichtung beteiligt sich HASY-LAB an der Ausbildung von Studenten der Physik über eine enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg.

Eine Außenstation des Europäischen Labors für Molekularbiologie EMBL sowie drei Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie der Max-Planck-Gesellschaft führen an neun Messplätzen Untersuchungen zur Bestimmung biologischer Strukturen durch. Ein neuer Messplatz für Proteinkristallographie wurde errichtet und von einem Konsortium, bestehend aus dem EMBL, dem Institut für Makromolekulare Biologie (IMB) in Jena und dem Institut für Medizinische Biochemie und Molekulare Biologie des Universitätskrankenhauses Eppendorf (Hamburg) im Herbst 2001 in Betrieb genommen.

Das Engagement von EMBL für seine Außenstation in Hamburg hat kürzlich stark zugenommen. Die Zahl der verfügbaren permanenten Stellen in der Außenstation wird von 29 im Jahr 2000 auf 38 im Jahr 2003 steigen, die Labor- und Büroräume werden um 400 m² erweitert.

Nach zwei Jahren Vorbereitung hat die Biotech Firma Thetis-Institut für biomolekulare Naturstoffforschung IBN (Hamburg) ihre Arbeit auf dem DESY Gelände aufgenommen. Thetis bietet in Hamburg das komplette Spektrum der Wirkstoffentwicklung vom marinen Makro- und Mikroorganismus über Isolierung und Strukturaufklärung der aktiven Substanz, Toxikologie, Struktur-Aktivitäts- und Wirkstoff-Rezeptor-Beziehung bis hin zu den ersten Phasen der klinischen Studien. Die technische Ausstattung der Firma, einschließlich dreier NMR Spektrometer bei 500 und 800 MHz sowie zweier Massenspektrometer, ergänzt hervorragend die Messplätze für molekularbiologische Strukturuntersuchungen am Speicherring DORIS III.

Im Rahmen eines wissenschaftlichen Kolloquiums im März 2001 bei DESY wurden die wissenschaftlichen Perspektiven und die technische Realisierung von TESLA vorgestellt, wie sie auch im Technical Design Report nachzulesen sind. Das Treffen mit mehr als 1000 Teilnehmern, 40% davon aus dem Ausland, hat durch die neuen Forschungsmöglichkeiten, die durch den Linearbeschleuniger und das X-Ray Free Electron Laser (XFEL) Labor in Reichweite kommen, eine ungewöhnliche Aufregung hervorgerufen.

Am Freie-Elektronen Laser der TESLA Test Facility (TTF) wurde die Sättigung des SASE Prozesses am 10. September 2001 bei 98 nm erreicht. Dies ist die kürzeste Wellenlänge, die bisher von einem Freie-Elektronen Laser erreicht wurde. Die Pulsleistung von 1 GW wurde erreicht bei einer Pulslänge von 30-100 fs, die gemessene Pulsbrillanz von 10²⁸ Photonen/(sec \cdot mrad² \cdot mm² \cdot 0.1% Bandbreite) ist tatsächlich um neun Größenordnungen größer als der Wert, der heutzutage an den besten Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation in diesem Wellenlängenbereich erreicht werden kann. Die mittlere Leistung betrug ungefähr 5 mW, die mittlere Brillanz 10^{17} Photonen/(sec · mrad² · mm² · 0.1% Bandbreite). Die Strahlung wurde sorgfältig charakterisiert und alle Ergebnisse stimmen sehr gut mit der Theorie überein. Dieser Erfolg wird weltweit als ein Durchbruch auf dem Weg zum 0.1 nm Röntgenlaser gesehen (Abb. 62).



Abbildung 62: Entwicklung der mittleren Strahlungspulsenergie entlang des Undulators. Experimentelle Daten: Kreise, numerische Simulation: durchgezogene Linie. Rechts: Beugung der 95 nm FEL-Strahlung am Doppelspalt, die mit einer CCD-Kamera auf einem Ce:YAG Kristall beobachtet wurde. Die Spalte waren 200 µm breit, 2 mm lang und 1 mm voneinander getrennt.

Bereits wenige Wochen nach dem Erreichen der Sättigung am TTF FEL wurden erste Ablationsexperimente erfolgreich durchgeführt. Die gemessene Schwelle für die Schädigung von Spiegelmaterialien bei der Festlegung der Beamlines und der optischen Komponenten für die VUV FEL Nutzereinrichtung, die im Jahr 2004 verfügbar sein wird, ist höher als angenommen wurde. In einem weiteren Experiment wurde die Coulomb-Explosion an freien Xenon-Clustern untersucht.

Die Vorstudien für die mögliche Verbesserung der Speicherringe DORIS und PETRA wurden beendet und in einem ersten Schritt mit Vertretern der HASYLAB Hauptnutzergruppen diskutiert.

An den Workshops im Juli und an einem für alle Nutzer offenen Workshop im Oktober haben etwa 150 Nutzer teilgenommen. In Übereinstimmung mit den Empfehlungen des "Komitee für Synchrotronstrahlung", das die deutsche Synchrotronstrahlungsgemeinde repräsentiert, wurde ganz klar die PETRA-Option bevorzugt, unter der Vorraussetzung, dass der Betrieb des DORIS-Speicherringes in seiner momentanen Konfiguration fortgesetzt wird.

Die Leistung heutiger Quellen der dritten Generation kann bei PETRA übertroffen werden, wenn hier zusätzliche Dämpfungswiggler eingebaut werden (Abb. 63). Ein Abschnitt in der Größe eines Achtels des 2.3 km großen Umfangs des PETRA-Speicherringes muss komplett neu gebaut werden, um die Errichtung von etwa 13 Undulatorstrahlrohren zu ermöglichen.

In Übereinstimmung mit den Empfehlungen des Erweiterten Wissenschaftlichen Rates und des Verwaltungsrates von DESY wurde die Entscheidung getroffen, mit der Errichtung einer dedizierten Synchrotronstrahlungsquelle im PETRA-Speicherring im Januar 2007 zu beginnen. Detaillierte Designstudien für diese Einrichtungen sollen im Januar 2002 beginnen.

Als nächstes soll zwischen den Optionen entschieden werden, entweder den existierenden Booster-Ring zu modifizieren oder einen zweiten neuen Ring in den existierenden PETRA-Tunnel einzubauen. Zusätzliche



Abbildung 63: Brillianz eines durchstimmbaren Undulators, der für die Verbesserung des PETRA-Speicherringes mit Dämpfungswigglern vorgeschlagen wurde, im Vergleich zu Werten existierender Speicherringe der dritten Generation.

Mittel für Hoch- und Tiefbau, Ausstattung und Personal werden benötigt, um dieses Projekt realisieren zu können.

DORIS III wurde vom 15. Januar bis zum 17. Dezember 2001 mit Positronen bei einer Energie von 4.5 GeV und einem Eingangsstrom von bis zu 150 mA im 5-Bunch Modus betrieben. Typische Strahllebensdauern betrugen 10 Stunden zu Beginn und 20 Stunden am Ende eines achtstündigen Runs. 5358 Stunden geplanter dedizierter Strahlzeit wurden, getrennt durch jeweils eine Woche für Wartung, in acht Blöcke von etwa fünf Wochen gruppiert.

Zur Optimierung des DORIS-Betriebes wurden achtstündige Maschinenschichten jeweils am zweiten, dritten und vierten Donnerstag des jeweiligen Strahlzeitblocks eingefügt. Im Juli 2001 wurden zusätzliche kurze Shutdown-Zeiten eingeplant. Für Experimente, die eine spezielle Zeitstruktur benötigten, wurde der Speicherring im so genannten "Reduced Bunch Mode" für etwa 20% seiner Laufzeit betrieben. Auf Grund technischer Probleme erreichte die Betriebseffizienz von DORIS III nur 91.7% und damit nicht die Leistung aus dem Jahr 2000 von 94.4%.

Am PETRA-Speicherring konnten im Berichtsjahr 3100 Stunden dedizierter Strahlzeit geliefert werden. Dies wurde ermöglicht durch den Upgrade Shutdown des Lepton-Hadron Beschleunigers HERA. Im dedizierten Nutzerbetrieb beträgt die Strahllebensdauer ungefähr 12 Stunden bei einem mittleren Strom von 37 mA. 21 unterschiedliche Experimente konnten durchgeführt werden.

Während des viermonatigen Winter-Shutdowns 2000/ 2001 wurden bei DORIS III neue Vakuumkammern für die Quadrupol-Tripletts installiert, um die gegenseitige mechanische Kopplung dieser Komponenten zu entfernen. Da bis zu dieser Zeit die drei Injektions Kicker-Magnete nicht fertig wurden, konnten nicht alle neuen Vakuumkammern installiert werden. Dennoch konnte die horizontale Bewegung des Strahlorbitals im Speicherring um einen Faktor fünf reduziert werden, was zu einer signifikanten Verbesserung der Synchrotronstrahlungsstabilität geführt hat. Es ist geplant, im WinterShutdown 2002/2003 neue Kicker-Magnete zu installieren und die verbleibenden neun Vakuumkammern einzubauen.

Der HASYLAB Jahresbericht 2001 ist wie in den vergangenen Jahren als CD-Rom erschienen und im Internet veröffentlicht worden (www-hasylab.desy.de/science/annual_reports/2001_report/main.htm).

Im Jahr 2001 waren 252 Institute und etwa 1662 Wissenschaftler an der Vorbereitung und Durchführung von Experimenten am HASYLAB beteiligt. Auf dem Gebiet der Strukturbiologie arbeiteten 392 Wissenschaftler aus mehr als 86 Instituten, hauptsächlich aus Europa, an den EMBL Messplätzen und nutzten die Infrastruktureinrichtungen bei DESY (Abb. 64).

Beispiele für HASYLAB-eigene Forschung, die in den letzten drei Jahren von HASYLAB Mitarbeitern und Wissenschaftlern permanenter Gastgruppen auf dem DESY-Gelände durchgeführt wurden, sind in einer neuen Broschüre mit dem Titel "Research at HASY-LAB" gesammelt worden. Das Heft ist im HASYLAB Sekretariat erhältlich. Ein wesentliches Ziel dieser Broschüre ist es, Studenten und junge Wissenschaftler zu überzeugen, sich an Forschung mit Synchrotronstrahlung zu beteiligen.

Im Jahr 2001 sind zahlreiche Auszeichnungen für Forschungsarbeiten mit Synchrotronstrahlung verliehen worden:

Herr Prof. Kenneth Holmes vom Max-Planck-Institut für Medizinische Forschung Heidelberg hat den European Latsis Award für seine Pionierarbeiten auf dem Gebiet der Synchrotronstrahlung erhalten, sowie den Gregori-Aminoff-Award für seine bahnbrechenden Entwicklungen auf dem Gebiet der Strukturuntersuchungen von biologischen Makromolekülen wie Muskelproteinen.

Herrn Prof. Jochen R. Schneider, HASYLAB, ist der Preis der European Crystallographic Association für seine Pionierarbeiten zur Anwendung von γ -Strahlungsspektroskopie und hochenergetischer Synchrotronstrahlung sowie für seine Beiträge für die Entwicklung eines Freie-Elektronen-Lasers verliehen worden.

Herr Dr. Helmut Ehrenberg vom Institut für Materialwissenschaften der TU Darmstadt hat den Max-von-



Abbildung 64: Anzahl der Nutzer, die in den letzten elf Jahren bei HASYLAB Experimente durchgeführt haben. (Nutzer, die mehr als einmal zur Messzeit kamen, wurden nur einmal pro Jahr gezählt.)

Laue Preis der Deutschen Kristallographischen Gesellschaft und den Adolf-Messer Preis der TU Darmstadt für seine außergewöhnlichen Arbeiten zur Pulverdiffraktometrie erhalten.

Herrn Dr. Harald Reichert vom Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart ist der Walter-Schottky-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für seine innovativen Arbeiten, die zur Entdeckung von lokalen fünffachen Symmetrien in flüssigem Blei geführt haben, verliehen worden.

Herr Prof. Gerhard Materlik wurde zum Chief Executive Officer der neuen englischen Synchrotronstrahlungsquelle DIAMOND am Rutherford Appleton Laboratory berufen.

Erste Experimente an Clustern mit Gigawatt-Pulsen aus dem VUV-FEL

Hochintensive Strahlung aus Lasern im sichtbaren und infraroten Spektralbereich hat in den letzten Jahren ganz neue Forschungsfelder in der Physik und Chemie erschlossen und wichtige Entwicklungen in der optischen Technologie vorangetrieben. Bisher waren diese leistungsstarken Laser auf den optischen und angrenzenden ultravioletten Spektralbereich begrenzt. Der Freie-Elektronen Laser (FEL) für den Vakuum-Ultravioletten Spektralbereich (VUV), basierend auf dem SASE-Prinzip ("self-amplification of spontaneous emission"), liefert erstmals hochintensive Pulse im VUV und ermöglicht damit die Untersuchung optisch nichtlinearer Prozesse wie beispielsweise die Multiphoton-Ionisation.

Nur wenige Tage nachdem der FEL im September 2001 die Sättigung erreicht hatte, konnte mit ersten Experimenten an Molekülen und Clustern mit FEL-Strahlung begonnen werden. Ziel dieser Untersuchungen war, die Wechselwirkung extrem intensiver VUV-Pulse mit Materie zu studieren. Die ersten Experimente wurden an Edelgasatomen und Clustern durchgeführt. Der Vergleich von kondensierter Materie in Form von Clustern und Atomen in der Gasphase erlaubt es, intra-atomare Effekte und kollektive Phänomene, die durch die Kondensation hervorgerufen werden, zu unterscheiden.



Abbildung 65: Schematische Darstellung des Clusterexperimentes im Tunnel des VUV-FELs.

Die Experimente wurden am HASYLAB mit einer Molekularstrahlapparatur durchgeführt, die am Tunnelende des TTF-Beschleunigers installiert war. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 65 dargestellt.



Abbildung 66: Flugzeitmassenspektrum, das nach der Ionisation von Xenon-Clustern aus im Mittel 300 Atomen mit einem Schuss des FELs aufgenommen wurde. Die einzelnen Linien können atomaren Xenon-Ionen mit einer kinetischen Energie von einigen hundert eV zugeordnet werden. Die Aufspaltung einiger Linien rührt von der geringen Transmission des Detektors für Ionen mit einer hohen Geschwindigkeit senkrecht zum Detektor her.

Ein gepulster Strahl von Edelgasclustern wird durch die Expansion eines Gases bei hohem Druck durch eine kleine Düse hergestellt. Die Größe der Cluster kann durch den Druck an der Düse kontrolliert werden. Der Clusterstrahl tritt durch einen Skimmer in die Hauptkammer des Experimentes ein. Die FEL-Strahlung mit einer Wellenlänge von 98 nm (Bandpass 0.5 nm) wird mit einem elliptischen Spiegel auf den Clusterstrahl fokussiert. Bei einem Fokusdurchmesser von 20 µm und einer Pulslänge von etwa 100 fs beträgt die Leistungsdichte im Fokus bis zu 10¹⁴ W/cm². Sie kann um zwei Größenordnungen reduziert werden, indem der Clusterstrahl aus dem Fokus bewegt wird. Die bei der Wechselwirkung mit dem FEL-Strahl erzeugten Ionen und Elektronen wurden mit Flugzeitspektrometern nachgewiesen und mit einem digitalen Oszilloskop mit einer Repititionsrate von 1 Hz registriert. Die Intensität eines FEL-Pulses ist so hoch, dass ein komplettes Flugzeitmassenspektrum in einem einzigen Schuss aufgenommen werden kann.

Abbildung 66 zeigt ein Flugzeitmassenspektrum, das nach der Beleuchtung von Xenon-Clustern mit einer mittleren Clustergröße von 300 Atomen aufgenommen wurde. Überraschenderweise werden lediglich atomare Xenon-Ionen mit bis zu achtfachem Ladungszustand beobachtet. Dies steht in krassem Gegensatz zu Experimenten mit geringer Leistungsdichte, bei denen schwere Clusterionen nachgewiesen werden, deren Masse der der neutralen Cluster entspricht. Die Linien im Massenspektrum sind stark verbreitert und zum Teil aufgespalten. Dies lässt sich mit der hohen kinetischen Energie der Ionen erklären. Aus der Verbreiterung der Linien und der Aufspaltung kann die Energie der Ionen bestimmt werden. Sie nimmt mit dem Ladungszustand zu und beträgt bis zu 2.5 keV bei Xe⁷⁺. Molekulare Fragmente (Xe^{2+} , Xe^{3+} , Xe^{4+} ..) wurden bei der höchsten Leistungsdichte von 10¹⁴ W/cm² nicht beobachtet. Dies deutet darauf hin, dass die Cluster mehrfach ionisiert werden und anschließend komplett zerfallen. Bei der Ionisation werden einzelne atomare Ionen erzeugt, die sich aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung abstoßen. Diesen Prozess bezeichnet man als Coulomb-Explosion (Abb. 67).

Die Ionisationsprozesse hängen stark von der Leistungsdichte der Strahlung ab (Abb. 68). Bei reduzierter Leistungsdichte nimmt die Intensität von hochgeladenen Ionen ab. Dies zeigt, dass bei den hohen Leistungs-



Abbildung 67: Schematische Illustration der Ionisationsdynamik von Edelgasclustern. Bei moderater Leistungsdichte (bis 10^9 W/cm²) dominiert die Fragmentation in einige wenige Bruchstücke. Bei sehr hoher Leistungsdichte (> 10^{12} W/cm²) zerfällt der Cluster komplett durch Coulomb-Explosion.

dichten optisch nichtlineare Prozesse in den Clustern induziert werden. Bei großen Clustern werden mit dem FEL bis zu 250 eV pro Atom deponiert, dies entspricht der Absorption von etwa 20 Photonen pro Atom. Dieser Wert kann aus der kinetischen Energie der Xenon-Ionen bestimmt werden. Die Ionisationsdynamik hängt stark von der Größe der Cluster ab.

In Abbildung 69 sind Massenspektren von Clusterstrahlen und einem Atomstrahl verglichen. Während in großen Clustern aus bis zu 30000 Atomen die höher geladenen Ionen überwiegen, zeigt sich, dass Xenon-Atome unter den gleichen Bedingungen lediglich einfach ionisiert werden. Dies bedeutet, dass die Atome im Cluster die FEL-Strahlung wesentlich intensiver absorbieren als in isolierten Atomen. Neben Atomen und Clustern wurden auch Moleküle untersucht (N₂, H₂O). Ganz generell zeigen die Messungen, dass die Ionisation in Molekülen und Clustern viel effektiver als in isolierten Atomen abläuft. Vermutlich erfolgt die starke Absorption durch sequentiell ablaufende Multi-Photonprozesse. Mögliche Absorptionsprozesse in Clustern sind inverse Bremsstrahlung und Plasmonen-Absorption. Effektive Absorption und Dissoziation von Clustern, insbesondere Coulomb-Explosion, ist ein Phänomen, das auch bei der Bestrahlung von Clustern mit Hochleistungs-Infrarot-Lasern beobachtet wird. Die Ionisation erfolgt im Infraroten



Abbildung 68: Flugzeitmassenspektren von Xenon-Clustern, aufgenommen bei verschiedenen Leistungsdichten.

vorzugsweise durch Feldionisation. Im VUV sind vermutlich andere Prozesse dominant, insbesondere die Multi-Photonabsorption, da die Feldionisation wegen der hohen Frequenz der Strahlung nicht so effektiv ist. Zur detaillierten Interpretation der Ergebnisse sind weitere Experimente und theoretische Arbeiten notwendig.

Die ersten Experimente belegen, dass auch bei kurzen Wellenlängen optisch nichtlineare Prozesse eine wichtige Rolle spielen. Sie zeigen darüber hinaus, dass der VUV-FEL völlig neue und aufregende Forschungsmöglichkeiten im Bereich der nichtlinearen Optik und der Multi-Photonprozesse eröffnet.



Abbildung 69: Flugzeitmassenspektren von Xenon-Clustern unterschiedlicher Größe im Vergleich mit einem am Atomstrahl aufgenommenen Spektrum. Die für ruhende Ionen berechneten Flugzeiten sind im oberen Teil der Abbildung markiert. Die Verschiebung der Linien ist ein Maß für die kinetische Energie der Ionen. Man erkennt deutlich, dass höhere Ladungszustände und die kinetische Energie der Ionen mit der Clustergröße zunehmen.

Texturuntersuchungen mittels hochenergetischer Synchrotronstrahlung

Die meisten technisch genutzten Werkstoffe sind vielkristallin. Sie bestehen aus sehr vielen kleinen Kristalliten, die zusammen das polykristalline Gefüge bilden. Da die meisten Eigenschaften von Kristallen anisotrop sind, hängen die Eigenschaften des vielkristallinen Stoffes außer von denen der Kristallite auch von der räumlichen Anordnung und der Orientierung der Kristallachsen der Kristallite im



Abbildung 70: Schematischer Aufbau der Beugungsapparatur zur Gefügeabbildung. Sie enthält eine Bragg-Winkel Blende und einen kontinuierlich beweglichen Flächendetektor, dessen Bewegung mit Probentranslation oder -rotation gekoppelt werden kann. Auch zeitliche Veränderungen oder der Einfluss äußerer Parameter können abgebildet werden.

Gefüge ab. Die Eigenschaften der Kristallite können als bekannt vorausgesetzt werden, wenn man die chemische Zusammensetzung der Stoffe und damit die Kristallstrukturen kennt. Größe, Form, Anordnung und Orientierung der Kristallite, das heißt die Orientierungsstereologie, hängen aber entscheidend von der Vorgeschichte des Materials ab, zum Beispiel von dessen technologischen Herstellungsparametern.

Um die Eigenschaften eines vielkristallinen Stoffes verstehen zu können, muss man daher die Gefügeparameter kennen, das heißt drei Orts- und drei Orientierungskoordinaten jedes Kristalliten {xyz, $\omega\gamma\psi$ }.

Die Ortskoordinaten allein kann man mit mikroskopischen Methoden bestimmen (quantitative Metallographie). Die Orientierungskoordinaten allein erhält man mit konventionellen Beugungsmethoden (Texturanalyse). Beide Parameter gleichzeitig liefert die Elektronenbeugungs-Raster-Mikroskopie. Wegen der geringen Eindringtiefe der Elektronen ist diese Technik aber auf die Oberfläche des Materials beschränkt, die nicht immer repräsentativ für das gesamte Material ist.

Die Beschränkung auf die Oberfläche besteht bei der im Folgenden skizzierten Methode der Beugungs-Abbildung des Gefüges mittels hochenergetischer Synchrotronstrahlung nicht. Zur kontinuierlichen Abbildung verschieden orientierter Schnittflächen und Projektionen des sechsdimensionalen Orientierungs-Ortsraumes wird ein kontinuierlich bewegter Flächendetektor verwendet. Diese Technik wurde bereits früher mit photographischem Film als Flächendetektor und konventioneller Röntgenstrahlung angewendet. Die erforderliche Orts- und Winkelauflösung erreicht man aber nur aufgrund der hohen Brillianz von Synchrotronstrahlung und bei Eindringtiefen, die groß gegenüber der Korngröße sind. Dies ist nur mit kurzwelliger Strahlung möglich, wie sie zum Beispiel an der Beamline BW5 im HASYLAB zur Verfügung steht.



Abbildung 71: Orientierungs- und Ortsabbildung eines kornaufgelösten Gefüges. Die Probe ist ein rekristallisiertes Nickelblech.

Der schematische Aufbau des Instrumentes ist in Abbildung 70 skizziert. Ein fein ausgeblendeter, bereits monochromatisierter Röntgenstrahl fällt auf die polykristalline Probe und erzeugt dort ein System von Debye-Scherrer Kegeln. Mit Hilfe einer Bragg-Winkel Blende wird daraus nur ein Sektor eines Kegels (hkl) ausgeblendet und fällt auf den Flächendetektor. Dieser wird während der Belichtung kontinuierlich in y-Richtung bewegt, während gleichzeitig die Probe in drei Richtungen {xyz} verschoben und um drei Winkel { $\omega \chi \varphi$ } gedreht werden kann. Dadurch wird ein beliebiger "Pfad" des Orientierungs-Ortsraumes auf die Detektorkoordinate y abgebildet. Die zweite Koordinate des Flächendetektors ist der Orientierungswinkel γ (speziell wurden solche Orientierungs-Orts Pfade benutzt, bei denen nur um ω gedreht wird).

Abbildung 71 (oben) zeigt einen Orientierungsscan eines rekristallisierten Nickel-Bleches. In ihm sind die Normalrichtungen der Netzebenen (hkl) der Kristallite durch ihre Winkelkoordinaten $\{\omega\gamma\}$ abgebildet. Die dritte Winkelkoordinate, die Drehung ψ um den Beugungsvektor, die zur eindeutigen Beschreibung der



Abbildung 72: Orientierungs- und Ortsabbildung nicht-aufgelöster Gefüge: Orientierungsabbildung eines kaltgewalzten Nickelbleches (oben) und Ortsabbildung eines Rippenrohres aus Kupfer (unten).

Kristallorientierung erforderlich ist, bleibt dabei unerkannt. Außerdem muss man für diese Technik in y-Richtung eine breite Blende verwenden. Dann bleiben die Ortskoordinaten x und y unerkannt. Nur die z-Koordinate der Kristallite kann durch die Blende festgelegt werden.

Abbildung 71 (unten) zeigt einen Ortsscan desselben Nickel-Bleches in y-Richtung. Hier sind ebenfalls die Normalrichtungen der Ebenen (hkl) zu sehen, jedoch nur von denjenigen Kristalliten mit $\omega = 0^{\circ}$. Jeder Kristallit reflektiert den Röntgenstrahl, während er durch den Strahlquerschnitt läuft. Neben dem Orientierungswinkel γ zeigt Abbildung 71 unten daher die Ortskoordinate y des Kristalliten und seinen Durchmesser in dieser Richtung. Auch hier bleibt der dritte Orientierungswinkel ψ unerkannt. Die z-Koordinate ist durch die Blendenöffnung in dieser Richtung festgelegt. Die x-Koordinate bleibt jedoch unerkannt.

Wegen der hohen Brillianz der Synchrotronstrahlung können Blendengrößen im Mikrometer-Bereich eingesetzt werden. Damit können Korngrößen dieser Größenordnung aufgelöst werden. Auch Materialien mit noch kleineren Korngrößen können mit dieser Methode untersucht werden. Dann überlappen sich die Reflexe der einzelnen Kristallite, und man sieht nur noch Dichteverteilungen von Kristalliten.

Abbildung 72 (oben) zeigt die Orientierungsdichte der Normalrichtungen der Ebenen (hkl) eines kaltverformten Nickel-Bleches. Das entspricht einer (hkl) Polfigur der konventionellen Texturmesstechnik. Ein Beispiel mit starker Ortsabhängigkeit der Orientierungsdichte ist in dem Ortsscan in Abbildung 72 (unten) zu sehen. Es ist ein Rippenrohr aus Kupfer, das hier mit einer Ortsauflösung von 0.1 mm abgebildet wurde.

Untersuchung zur Strukturbestimmung von einzelnen makromolekularen Partikeln mit XFEL-Strahlung

Ein Verständnis der Funktion von Biomolekülen auf molekularer oder atomarer Basis ist in den meisten Fällen ohne die Kenntnis der dreidimensionalen Molekülstruktur nicht möglich. Diese bildet die Grundlage für viele weitergehende Untersuchungen bezüglich möglicher Interaktionen mit anderen Molekülen.

In den meisten Fällen wird diese Information neben der NMR-Spektroskopie und der Elektronenmikroskopie durch die Proteinkristallographie zur Verfügung gestellt. Auf dem Weg von der Kenntnis eines Gens zum Verständnis der Funktion des darin kodierten Proteins ist neben der Expression in einem geeigneten Organismus die Kristallisation der Biomoleküle eines der am schwierigsten zu überwindenden Hindernisse und damit der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Jede Methode, die dieses Problem umgehen könnte, und die dennoch die dreidimensionale Struktur mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen in der Lage ist, wäre von sehr großem Nutzen.

In bestimmten Fällen sind dazu die bereits erwähnte NMR-Spektroskopie bzw. die Kryo-Elektronenmikroskopie in der Lage. Erstere ist sowohl in ihrer Genauigkeit als auch in der Größe des zu bestimmenden Moleküls beschränkt, letztere ist immer noch weit davon entfernt, in den Bereich der atomaren Auflösung vorzustoßen.

Eine völlig neue Möglichkeit wird sich durch die kurzen und sehr intensiven Röntgenstrahlungspulse des TESLA-XFELs ergeben. Molekulardynamische Rechnungen des Verhaltens eines einzelnen Proteinmoleküls unter Einwirkung eines sehr kurzen und intensiven Röntgenpulses und unter Berücksichtigung der inelastischen Wechselwirkung mit der Strahlung ergeben folgendes Bild:

- Die auf Grund der inelastischen Wechselwirkungen mit der Strahlung auftretenden Strukturänderungen während der Zeit des Pulses sind um so kleiner, je kürzer die Zeit ist, in der eine gegebene Anzahl von Photonen auf die Probe trifft. Da es sich bei der überwiegenden Anzahl der inelastischen Streuprozesse um Photoionisationen handelt, bedeutet dies, dass die das Molekül zerstörende Coulomb-Explosion durch die Trägheit der Atomkerne vergleichsweise "langsam" in Gang kommt. Der quantitative Zusammenhang ist in Abbildung 73 wiedergegeben.
- Da im allgemeinen die inelastischen Wechselwirkungsquerschnitte mit zunehmender Photonen-Energie abnehmen, sind höhere Energien von Vorteil.
- Bei der für den XFEL zu erwartenden Pulslänge von 100 fs sind die zu erwartenden Strukturänderungen bei einer Photonen-Energie von 12 keV und einer Flußdichte von etwa 5×10^{10} Photonen auf einer Fläche von $(100 \text{ nm})^2$ noch tolerabel.

Diese Berechnungen geben eine Abschätzung für die Stabilität biologischer Proben unter dem Einfluss kur-



Abbildung 73: Probenschädigung als Funktion der Pulslänge für verschiedene Photonenanzahlen pro Puls und als Funktion der Photonen-Energie. Als Bewertungskriterium R wurde der Unterschied zwischen den Beugungsbildern ungestörter und unter Strahlungseinwirkung modellierter Proben herangezogen. In a) wurde hierbei vernachlässigt, dass die Strahlenschädigung nicht nur die Atompositionen sondern auch die Elektronenhülle selbst ändert. Der Unterschied zwischen a) und b) macht deutlich, dass bei sehr kurzen Pulsen die Atomkerne "sehr lange" auf ihren Positionen verharren, bevor die Coulomb-Explosion einsetzt. In c) wurde die Anzahl der elastisch gestreuten Photonen konstant gehalten und die Energieabhängigkeit der Schädigung untersucht.

zer, intensiver Röntgenpulse und dienen als Grundlage für weitere Betrachtungen. Berechnet man unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse und unter idealisierten experimentellen Bedingungen die gestreute Intensität eines XFEL-Pulses an einem einzelnen Makromolekül, so ist diese sehr gering. Die Situation ändert sich bei der Beugung an großen makromolekularen Komplexen, wie zum Beispiel der Hülle eines Virus. Selbst in diesem Fall ist die gestreute Intensität klein, sie sollte jedoch ausreichen, um die Orientierung des Moleküls während der Belichtung aus den Streudaten mit hinreichender Genauigkeit zu rekonstruieren (Abb. 74). Die dazu notwendigen Verfahren wurden bereits für die Einzelpartikel-Rekonstruktion in der Tieftemperatur-Elektronenmikroskopie entwickelt. Dadurch sollte es möglich sein, die dreidimensionale Streudichteverteilung eines derartigen makromolekularen Komplexes aus einer großen Anzahl von Einzelaufnahmen zu rekonstruieren.

Das bei der Strukturlösung von Kristallen auftretende Phasenproblem, das heißt nur die Amplituden und nicht die Phasen der gebeugten Wellen sind experimentell zugänglich, wirkt sich bei den nicht translationsperiodischen Streudichteverteilungen nichtkristalliner Objekte weniger gravierend aus als bei Kristallen. Zur Illustration ist in Abbildung 61 der Unterschied der Intensitätsverteilung im reziproken Raum von einem einzelnen Makromolekül und einem Nanokristall des gleichen Moleküls gezeigt. Es wird deutlich, dass für einen Kristall Intensitäten nur an den reziproken Gitterpunkten gemessen werden können. Damit verringert sich der Informationsgehalt im Vergleich zu einem nicht translationsperiodischen Objekt dramatisch. Neuere Arbeiten haben gezeigt, dass es durch numerische Verfahren relativ einfach möglich ist, die Elektronendichte aus einer kontinuierlichen Streudichteverteilung zu bestimmen.

Die Beugung eines sehr intensiven Röntgenpulses an einem derart kleinen Objekt wie einem einzelnen Virus stellt besondere Anforderungen an die Reduzierung des experimentell bedingten Untergrunds der Messung. Hierbei kann man auf die bereits gut entwickelte Technik der Elektrospray-Massenspektrometrie zurückgreifen. Mit diesem Verfahren ist es möglich, einzelne Partikel mit einer Hydrathülle definierter Dicke in einen Vakuumrezipienten zu injizieren. Die technisch an-



Abbildung 74: Streubild der Hülle eines BTV-Virus für einen Puls von $5 \cdot 10^{10}$ Photonen fokussiert auf 0.1 µm; Photonen-Energie: 12.4 keV; Detektorabstand 1800 mm, Pixelgröße: 0.78 mm; die Intensität ist nach einer logarithmischen Farbskala aufgetragen. Die Intensitäten sind als Funktion der Pixelkoordinaten in X-und Y-Richtung aufgetragen. Nur durch das Mitteln einer sehr großen Anzahl derartiger Beugungsbilder kann die komplette 3D-Streudichte rekonstruiert werden.

spruchsvolle Aufgabe wird sein, den Partikelstrahl mit dem fokussierten XFEL-Strahl zur Deckung zu bringen. Das Clusterexperiment am TTF1 hat jedoch gezeigt, dass dies durchaus machbar ist. Da in einer derartigen Anordnung die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Probe im Vakuum ohne Probenhalter stattfindet, sollte der zusätzliche Streuuntergrund minimal sein. Die mit einem derartigen Verfahren erreichbare Auflösung, das heißt die Präzision der Atompositionen, hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: von der Streuung der Atomanordnungen der einzelnen Partikel untereinander und von der Genauigkeit, mit der im Nachhinein die Orientierung jedes einzelnen Partikels festgestellt werden kann. Vor allem der zweite Punkt ist derzeit Gegenstand theoretischer Untersuchungen.

Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie EMBL –Außenstation Hamburg–

Leitung: M. Wilmanns, V. Lamzin

Gruppenleiter: C. Hermes, M. Koch, W. Meyer-Klaucke, D. Svergun, P. Tucker

Im Januar 2001 begann das neue 5-Jahresprogramm des Europäischen Molekularbiologielabors (EMBL). Mit zusätzlichen Mitteln aus diesem Programm ist es nun möglich, eine dringend notwendige Gebäudeerweiterung der EMBL-Hamburg Außenstation im Jahr 2002 durchzuführen, und die Ausrüstung der Mess-Stationen am Fächer K zu verbessern. Mit dem Umbau der Mess-Station X12 für MAD-Experimente im Bereich der Biokristallographie wurde begonnen.

Verbunden mit dem neuen Forschungsprogramm hat EMBL entschieden, sich zukünftig auf die neuartigen Möglichkeiten zu konzentrieren, die sich aufgrund der gewonnenen Genomikdaten und der dadurch entstandenen Technologien im Bereich der Genomik und Proteomik ergeben haben.

Mit zwei erfolgreichen institutionellen Drittmittelprojekten aus dem Jahr 2001 wird von EMBL Hamburg angestrebt, eine führende Rolle in Deutschland als Koordinator des Hamburger TB-Strukturgenomikprojektes und in Europa als Partner im EU-geförderten SPINE-Projekt einzunehmen. Als zentrales Element ist der Aufbau einer automatisierten Kristallisationseinheit im Hochdurchsatz geplant. Nachdem im Oktober 2001 von DESY entschieden wurde, den PETRA-Ring für zukünftige State-of-the-Art Synchrotron-Messs-Stationen zur Verfügung zu stellen, haben bei EMBL Planungen für eigene Mess-Stationen begonnen. Diese Planungen werden auch im kommenden Jahr im Mittelpunkt der Aktivitäten stehen.

Wir danken DESY und HASYLAB für die Bereitstellung der Infrastruktur und Synchrotronstrahlung im Jahre 2001.

Im weiteren Teil des Berichtes sind die wissenschaftlichen Aktivitäten der Forschungsgruppen aus den Bereichen Instrumentierung, Kleinwinkelstreuung, Röntgensabsorptionsspektroskopie und Biokristallographie, zusammengefasst.

Weitere Projekte in Zusammenarbeit mit auswärtigen Gruppen und Einzelheiten sind im EMBL Jahresbericht dargestellt:

(www.embl-hamburg.de/annual_report_2001.html).

Instrumentierung der Synchrotron-Mess-Stationen

Wie im Bericht des Vorjahres erwähnt, sollten die drei Strahlführungen der Proteinkristallographie am Fächer K von DORIS komplett neu gestaltet werden. Im neuen Aufbau sind die Strahlführungen X11 und X13, die bei konstanter Wellenlänge von etwa 0.8 Å arbeiten, vollständig symmetrisch zur zentralen Strahlführung X12 angeordnet. Die Strahlführung X12 soll zur Durchführung von MAD-Experimenten komplett neu aufgebaut werden und Messungen in einem weiten Wellenlängenbereich ermöglichen. Der Umbau des Fächers wurde Ende 2000 begonnen und in mehreren Stufen im Jahr 2001 weitergeführt.

Die veränderte Geometrie der Strahlführungen erforderte weitreichende Umbaumaßnahmen von Optik- und Experimentierhütten, Strahlenschutzeinrichtungen sowie der gesamten Versorgungsinfrastruktur. Im Frühjahr 2001 konnte mit dem Wieder- bzw. Neuaufbau der Strahlführungen begonnen werden, nachdem vorher der gesamte Bereich des Fächers K geräumt, Komponenten abgebaut und zur Wiederverwendung eingelagert worden waren.

Wegen der veränderten Geometrie mussten die Vakuumgefäße der drei Strahlführungen modifiziert oder neu konstruiert und angefertigt werden, während die optischen Komponenten in diesen Behältern, wie Monochromatoren, Röntgenspiegel, Blendensysteme sowie

EMBL



Abbildung 75: Blick von oben in das gemeinsame Vakuumgefäß der Monochromatoren von X13 (oben) und X11 (unten). Die von links kommende weiße Strahlung wird durch wassergekühlte Wolframblenden eingegrenzt, bevor sie auf die dreieckigen Si-Monochromatoren trifft. Der zentrale Teil des Strahlungsfächers für die zukünftige Strahlführung X12 wird zur Zeit durch einen beweglichen Wolframblock ausgeblendet.

deren gesamte Justiermechanik, vollständig neu entwickelt wurden. Dabei waren Vakuumkompatibilität, Strahlungsbeständigkeit sowie verbesserte Funktionalität und Zuverlässigkeit maßgebende Kriterien bei der Neukonstruktion. So konnte zum Beispiel durch eine weitaus effizientere Kühlung der fokussierenden Si-Monochromatoren sowohl die zeitliche Stabilität der Strahlung als auch deren Intensität an der Probe gesteigert werden. Mitentscheidend für diesen signifikanten Intensitätsgewinn um einen Faktor drei gegenüber der alten Anordnung war außerdem der Einsatz von kontinuierlichen, Rh-beschichteten Röntgenspiegeln, die eine verbesserte Fokussierung der Strahlung ermöglichen, anstelle der bisher verwendeten segmentierten Quarzspiegel. Abbildung 75 zeigt die Anordnung der Monochromator-Kristalle in ihrem gemeinsamen Vakuumgefäß, während Abbildung 76 das Kühlschema des X11 Monochromators verdeutlicht.

Mitte des Jahres 2001 standen die entscheidend verbesserten Messplätze X11 und X13 wieder für regulären Messbetrieb zur Verfügung. Die Konstruktion der



Abbildung 76: Der X11 Monochromator: Der dreieckige Si-Kristall taucht in die flüssige Metall-Legierung (Galinstan) in einem wassergekühlten Edelstahlgefäß. Der vertikale Stift an der Spitze des Dreiecks dient zur Fokussierung. Ganz rechts ist der bewegliche Strahlfänger sichtbar.

zukünftigen MAD Strahlführung X12 ist abgeschlossen und wesentliche Komponenten liegen zum Einbau bereit. Erste Tests des fokussierenden Doppelmonochromatorsystems sind für die zweite Hälfte 2002 geplant.

Nichtkristalline Systeme

Im Laufe des Jahres wurden etwa 25 Projekte, die Synchrotronstrahlung anwenden, in Zusammenarbeit mit auswärtigen Gruppen durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Aspekte der Struktur oder Strukturänderungen von biologischen Makromolekülen, Lipiden, synthetischen Polymeren oder kolloidalen Systemen, die zum Beispiel als Arzneimittelträger entwickelt werden, studiert.

Die Ergebnisse dieser Projekte sind im HASYLAB Jahresbericht, im EMBL Forschungsbericht und in den 23 Publikationen der Gruppe, die im Jahre 2001 in internationalen Fachzeitschriften erschienen sind, beschrieben.



Abbildung 77: Struktur der Spitzen an der Oberfläche des PRD1 Bacteriophags: (A) Sicht aus dem Inneren des Virions, (B) Obenansicht: der Pfeil zeigt die mögliche Bindungsstelle des Proteins P2. In der Seitenansicht (C) sind die individuellen Untereinheiten einer Schicht P3-trimere in unmittelbarer Nähe der Spitze in verschiedenen Farben dargestellt.

In diesem Rahmen fanden Entwicklungen eines Datenerfassungssystems auf der Grundlage der Zeit-Raum-Zeit Umwandlung statt, das 2001 für eine Reihe von Projekten eingesetzt wurde. Der Erfolg eines solchen Instrumentierungprojekts kann am besten daran gemessen werden, dass es von seinen Nutzern weitgehend unbemerkt bleibt.

Ein Schwerpunkt der Forschung war auch in diesem Jahr die Entwicklung von Daten-Interpretationsmethoden für Lösungsstreuung von biologischen Makromolekülen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kristallographie in Moskau.

Das Modell der Spitzen an der Oberfläche des Bacteriophags PRD1 in Abbildung 77 zeigt, wie durch Anwendung dieser Methoden die Röntgenkleinwinkelstreuung an Lösungen für Biochemiker nützliche Information über die Wechselwirkung von Proteinen geben kann.

In verschiedenen Projekten wurden Strukturänderungen oder Phasenübergänge, die zum Beispiel bei thermischen Behandlungen stattfinden, als Gleichgewichtsstrukturen studiert. Hierbei wurde meistens versucht, diese Änderungen in zeitaufgelösten Messungen zu verfolgen und die Ergebnisse mit denen von anderen Methoden, wie Infrarotspektroskopie, Kalorimetrie oder Kleinwinkellichtstreuung, zu korrelieren. Diese Methoden sind besonders bei der Entwicklung von Nahrungsmitteln wie Stärke, synthetischen Polymeren und ihren Legierungen oder Arzneimittelträgern wichtig.

Die Grundsätze des EMBL sehen neben der Forschung auch Ausbildung- und Lehrtätigkeiten auf höherer Ebene vor. In diesem Rahmen wurde im September zusammen mit der GKSS (Geesthacht) ein erfolgreiches EMBO Praktikum über Lösungsstreuung an biologischen Makromolekülen organisiert. Neben einführenden Vorlesungen über Röntgen- und Neutronenstreuung, mathematische Methoden, Instrumentierung, Datenerfassung und Modellierung hatten die 40 Teilnehmer auch die Möglichkeit, ihre eigenen Proben zu messen und die Daten auszuwerten.

Röntgenabsorptionsspektroskopie

In vielen Biokatalysatoren (Enzymen) sind Metalle essentieller Bestandteil des aktiven Zentrums. Metalle wie Zink, Eisen, Kupfer oder Mangan sind dort an der chemischen Umsetzung der jeweiligen Substrate beteiligt. Die Röntgenabsorptionsspektroskopie erlaubt es, diese Metallatome als Sonden zu nutzen. Einzelne Zustände können dabei strukturell charakterisiert werden. Aus dem Wissen über diese Einzelaufnahmen kann dann ein Modell für den Reaktionsmechanismus entwickelt werden.

Des Weiteren kann auch die Bindung von reaktionshemmenden Molekülen (Inhibitoren) analysiert werden. Die Methode erlaubt die strukturelle Analyse dieser Zentren unabhängig vom Probenzustand, das heißt im Gegensatz zur Proteinkristallographie können diese Messungen auch an Lösungen erfolgen.

Die EMBL Außenstation Hamburg betreibt einen Messplatz für Röntgenabsorptionsspektroskopie an Biomolekülen und stellt ihn der internationalen Nutzergemeinde zur Verfügung. Im Jahre 2001 wurde eine Vielzahl von Projekten in Kooperation mit Labors aus Europa und den USA durchgeführt. Im Folgenden wird eines der internen Projekte kurz skizziert, um einen Einblick in die typischen Fragestellungen und Arbeitsweisen zu geben.

Beta-Laktamasen sind eine der Ursachen für bakterielle Resistenzen gegen Antibiotika. Bereits seit mehreren Jahren sind wir an der Entschlüsselung des Reaktionsmechanismus der Metallo-Beta-Laktamasen beteiligt. Zu dieser Proteinfamilie zählen noch weitere Enzyme die über ein ähnliches aktives Zentrum verfügen, zum Beispiel Glyoxalase II, welche auch im Menschen für die Zellentgiftung wichtig ist.

Neben diesen Enzymen wurde ein neues Enzym untersucht, welches im Zusammenhang zu einigen Krebsarten zu stehen scheint. Im EMBL Molekularbiologielabor konnte dieses Enzym weltweit zum ersten Mal isoliert und in den für weitere Untersuchungen notwendigen Mengen hergestellt werden. Hierbei konnte bestätigt werden, dass Zink essentiell für seine Funktion ist. Das Metallbindungsmotiv ähnelt den Beta-Laktamasen. Diese erste strukturelle Einordnung hilft bei der weiteren funktionellen Untersuchung. In Kombination von molekularbiologischer und spektroskopischer Arbeit wird beleuchtet werden, welche Voraussetzungen Inhibitoren erfüllen müssen, um die Reaktivität der bakteriellen Metallo-Beta-Laktamasen zu verringern, ohne die Reaktivität anderer essentieller Enzyme zu beeinflussen. Auf diesem Weg soll ein Beitrag zum Verständnis dieser Enzymklasse geleistet werden, so dass spezifische Inhibitoren für die medizinische Anwendung entwickelt werden können.

Biokristallographie

Alternative Strategien zur Phasenbestimmung unter der Verwendung von Xenon

Die in der Proteinkristallographie üblichen Methoden zur experimentellen Phasenbestimmung beruhen auf Diffraktionsexperimenten bei einer (SAD) oder mehreren Wellenlängen (MAD) und nutzen das anomale Signal von Selenatomen, die als Selenomethionin mit Hilfe von heterologen Expressionssystemen in Proteine eingebaut wurden. Das Interesse gilt der Erweiterung dieser Möglichkeiten, die Phasen zu bestimmen. Wie bereits vorher gezeigt werden konnte, kann das Edelgas Xenon zur Derivatisierung und damit zur Phasierung herangezogen werden. Dazu wird es entweder als isomorphes Schweratomderivat betrachtet (SIR, MIR), oder man nutzt seine anomale Streuung als Quelle zur Phasenbestimmung aus (SIRAS, MIRAS). Eine ganze Reihe von Geräten wurde entwickelt, um einen Proteinkristall unter hohem Druck einer Xenon-Atmosphäre auszusetzen, danach den Druck wieder abzusenken und den Kristall schnell einzufrieren, um das gebundene Xenon nicht wieder entweichen zu lassen.

Einige dieser Geräte stehen den Nutzern der EMBL Hamburg Mess-Stationen zur Verfügung. Die Derivatisierung mit Xenon wurde bisher ausschließlich unter der Zuhilfenahme von hydrophilen Additiven (beispielsweise Glyzerin, Sucrose, Ethylenglykol) durchgeführt, um die Keimbildung von hexagonalem oder kubischem Eis zu verhindern, wenn der Kristall schnell auf –180°C abgekühlt wird. Allerdings werden die Schwierigkeiten, ein geeignetes Gefrierschutzmittel zu finden, in dem der Kristall über einige Minuten stabil bleibt, oftmals nicht publiziert.

Es ist daher wichtig, eine möglichst breite Palette an Möglichkeiten für die Xenon- (oder Krypton-) Derivatisierung zu haben. Zum einen ist Xenon in hydrophoben Lösungsmitteln besser löslich als in Wasser, und zum anderen kann die an dem Kristall haftende Mutterlauge auch durch ein Ziehen des Kristalls durch Paraffinöl entfernt werden (eine alte Technik, die in letzter Zeit für die Proteinkristallographie wiederentdeckt wurde). Kombiniert man diese beiden Befunde, so lässt sich die Xenon-Derivatisierung mit der gleichen, wenn nicht einer besseren Ausbeute durchführen. Dazu wurden Kristalle von Elastase aus dem Schweinepankreas (PPE, Molekulargewicht etwa 22 000 Da) mittels trockenem Paraffinöl bzw. PanjellyTM kryogeschützt, und dann vor dem schnellen Abkühlen einer Xenon-Atmosphäre ausgesetzt.

Strukturelle Grundlagen in der Regulation von Transkriptionsfaktoren

Das menschliche Genom enthält hunderte von Transkriptionsfaktoren, die das Ausmaß der Bereitstellung praktisch aller Akteure von biologischen Prozessen, den so genannten Proteinen, regulieren. Sie üben diese Regulation aus, indem sie die Transkription der jeweiligen DNA-Gene in ihre Produkte, die Proteine, durch Bindung an spezifische Regionen der Targetgene steuern. Diese Transkriptionsfaktoren regulieren aber nicht nur diesen Übersetzungsprozess, sondern sind selbst auf mehrfachen Ebenen Steuerungen unterworfen, die zum Beispiel durch die Bindung von zusätzlichen Aktivatoren, Repressoren und anderen spezifischen Rezeptoren erfolgen. Damit wird deutlich, wie wichtig die exakt portionierte Bereitstellung von Proteinen zu bestimmten Zeiten und in bestimmten Zellen ist, um zum Beispiel Zellwachstum und -differenzierung zu steuern. Sobald, in vielen Fällen nur geringfügig, diese Steuerungsmechanismen nicht mehr exakt ausbalanciert sind, geraten diese biologischen Prozesse schnell außer Kontrolle und können dann zum Beispiel zu vielfältigen Tumoren führen.

Unsere Gruppe beschäftigt sich mit strukturbiologischen Fragestellungen von zwei prototypischen Mitgliedern, Oct-1 und Oct-1, einer dieser Transkriptionsfaktorfamilien, der so genannten POU-Familie. Diese Faktoren regulieren eine Vielzahl biologischer Prozesse, wie zum Beispiel im Bereich des so genannten House-Keeping (Oct-1), der Programmierung von embryonalen Stammzellen (Oct-4) bis hin zur Entwicklung und Adaption von Immunantworten (Oct-1, Oct-2). Die geringe Zahl von Transkriptionsfaktoren aus dieser Familie (15 im menschlichen Genom) erfordert daher komplizierte und divergente Kontrollmechanismen wie zum Beispiel post-translationale Modifikationen, Interaktionen mit heterologen Transkriptionsfaktoren und flexible DNA-Bindung. Diese für die Mitglieder der POU-Transkriptionsfaktorfamilie einzigartige Flexibilität beruht auf einer flexiblen Verbindung der beiden kanonischen DNA-Bindungsdomänen, die als POU-Homeodomäne und POU-spezifische Domäne bezeichnet werden. Je nach Mitglied aus dieser Transkriptionsfaktorfamilie variiert die Sequenz und die Länge dieser Verbindungen zwischen 15 und mehr als 50 Aminosäureresten. Da beide DNA-Bindungsdomänen strukturell autonom sind, sind unterschiedliche Anordnungen dieser Domänen in Gegenwart von spezifischen DNA-Motiven möglich.

In B-Zellen, die in der Immunologie eine wichtige Rolle spielen, wird die Aktivität von Oct-1 durch einen Lymphen-spezifischen Koaktivator OBF-1 reguliert, in dem er sich zwischen die beiden DNA-bindenden Domänen von Oct-1 einklammert. Auf molekularer Ebene wurde, in Zusammenarbeit mit der Universität Pennsylvania, gezeigt, dass dieser Koaktivator zum Beispiel die Expression des Osteopontin-Gens durch Oct-4 regelt, nicht aber die so genannten VH-Promoter. Diese Ergebnisse erlaubten die Etablierung des Paradigmas für differenzielle Transkriptionsregulation durch unterschiedliche POU-Dimerkonformationen.

Um die strukturelle Basis dieses Phänomens zu bestimmen, wurden zwei Kristallstrukturen der DNAbindenden Bereiche des Transkriptionsfaktors Oct-1 gelöst, in Gegenwart von zwei unterschiedlichen DNA-Motiven, die PORE und MORE genannt wurden und die die Szenarios von Osteopontin-Expression und VH-Expression vertreten. Die kristallographischen Daten wurden an Mess-Stationen am DORIS-Speicherring aufgenommen. Der direkte Vergleich dieser beiden Strukturen zeigt, dass die gleiche Polypeptidkette von Oct-1 in der Lage ist, zwei völlig unterschiedliche Dimer-Arrangements zu bilden mit jeweils zwei austauschbaren Oberflächenbereichen, die Kontaktflächen im jeweiligen Dimer bilden können (Abb. 78).

Mit Hilfe dieser Daten wurde das Konzept der DNAabhängigen Transkriptionsfaktor-Dimerisierung einge-



Abbildung 78: Dieses Bild zeigt, basierend auf den Kristallstrukturen von Oct-1/MORE und Oct-1/PORE, wie sich der gleiche Transkriptionsfaktor unterschiedlich mit spezifischen DNA-Motiven assoziieren kann. (Ansgar Phillipsen, Univ. Basel)

führt, die sowohl von der Sequenz der jeweiligen DNA als auch von den Abständen der beiden Bindungsmotive abhängt.

Die ARP/wARP Software Suite zur Automatisierung der Kristallstrukturbestimmung

Seit Beginn der Proteinkristallographie war ein Schwerpunkt in diesem Forschungsgebiet die Verbesserung und Automatisierung der einzelnen Schritte der Strukturlösung. In den meisten Bereichen der modernen Molekularbiologie wächst das Wissen sprunghaft an. Wissenschaftler suchen Antworten auf eine immer größer werdende Anzahl von interessanten und komplexen biologischen Fragen und bestimmen daher auch eine große Anzahl von Proteinstrukturen. Vor dem Hintergrund der Strukturgenomik-Ära wird es immer wichtiger, schnelle, sichere, objektive und automatische Methoden zur Lösung makromolekularer Strukturen zur Verfügung zu haben.

Wenn das Phasenproblem einmal gelöst ist, sieht sich die Kristallographie einem neuen Problem gegenüber: der Interpretation der Elektronendichte, die sich nicht von selbst erklärt. Die Reduktion einer in 3-D kontinuierlichen Elektronendichteverteilung zu Atomen mit verschiedenen Typen und Bindungen, aus denen das Modell besteht, ist eine sehr umfangreiche Aufgabe. Viel Zeit und großer Aufwand sind oft nötig, um ein erstes Modell aus einer interpretierbaren Elektronendichte zu erstellen und es dann zu verfeinern, bis es bestmög-



Abbildung 79: Automatische Verfeinerung und Bau der Struktur von Leishmanolysin bei 2.0Å Auflösung, wobei während weniger CPU-Stunden ein praktisch vollständiges Modell entstand. Links: Region in der Start-Elektronendichte mit freien Atomen. Rechts: Dieselbe Region mit der Elektronendichte nach ARP/wARP und dem automatisch gebauten Modell.

liche Übereinstimmung mit den kristallographischen Daten erreicht.

Trotz jüngster Fortschritte in der Dichteinterpretation und Strukturerkennung in der Proteinkristallographie ist der momentane Stand der Automatisierung eher bescheiden, und es existiert große Abhängigkeit von einem Benutzer, um die wichtigen und relevanten Entscheidungen zu treffen. Die ARP/wARP Software, die beim EMBL Hamburg gemeinschaftlich mit dem NKI Amsterdam entwickelt wurde, bietet Möglichkeiten, die nahe an volle Automation herankommen und es erlauben, ein makromolekulares, atomares Modell praktisch vollständig zu bauen.

Die Methode setzt Daten mit einer Auflösung von 2.3 Å oder besser und geeignete Startphasen voraus. ARP/wARP revolutioniert konventionelle kristallogra-

phische Verfeinerung von Makromolekülen durch die Real-Space Manipulation des Modells, indem es die Eingriffe des Benutzers in silica nachspielt. Die erste Elektronendichte wird zunächst als freie, unverbundene Atome parametrisiert, die praktisch jedes Detail der Map beschreiben. Diese Atome werden dann durch Hinzunahme/Wegnahme einer wiederholten Neugruppierung unterworfen, einer Strukturerkennung von proteinähnlichen Fragmenten und komplettem Wiederaufbau der Proteinkette.

Zum Abschluss werden Seitenketten in optimaler Konformation eingebaut. Diese Prozedur ist an eine Optimierung der Modellparameter gegen die kristallographischen Daten gebunden und konvergiert schließlich zu einem Set von Polypeptidketten mit den übrigen freien Atomen als Lösungsmittelmoleküle. Ein Beispiel ist in Abbildung 79 gezeigt.



Abbildung 80: Transkriptionsfaktor NusA von Thermotoga maritima. (Quelle: M. Worbs et al.: Mol. Cell 7 (2001) 1177)

Max-Planck-Gesellschaft Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie

Leiter: H.-D. Bartunik, E. Mandelkow (Sprecher), A. Yonath

Die Max-Planck-Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit den Beziehungen zwischen der Struktur und der Funktion von biologischen Makromolekülen. Thematische Schwerpunkte sind

- die Enzyme und ihr katalytischer Mechanismus,
- das Zytoskelett und seine Rolle in Zellbewegung und Alzheimer-Krankheit,
- das Ribosom und seine Funktion in der Proteinbiosynthese.

Die Proben werden mit biochemischen Methoden isoliert oder mit molekularbiologischen Methoden synthetisiert. Die wesentliche Methode der Strukturuntersuchung ist die Röntgenbeugung von Proteinkristallen, Fasern oder Lösungen; daneben werden weitere biophysikalische Analyseverfahren wie Spektroskopie, Elektronenmikroskopie, Bildverarbeitung und andere eingesetzt. Schwerpunkte methodischer und instrumenteller Entwicklungen sind neue Kristallisationsverfahren, Einsatz von elektronischen Detektoren, Laue-Methoden und eine Messstrecke für die Proteinkristallographie.

Forschungsschwerpunkte

Proteindynamik

Die MPG-Arbeitsgruppe für Proteindynamik untersucht Struktur-Funktionsbeziehungen von Proteinen. Sie setzt dabei Methoden der Proteinkristallographie bei ultra-hoher Auflösung, der Kryokristallographie sowie der Nanosekunden-zeitaufgelösten Röntgenbeugung ein. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von Methoden anomaler Phasenlösung und ihre Anwendung auf de-novo-Bestimmungen von Proteinstrukturen. Die Gruppe betreibt eine Messstation an der Wiggler-Beamline BW6 an DORIS. Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten lag bei der weiteren Entwicklung von Verfahren experimenteller Phasierung. Mit Hilfe anomaler Streuung bei einer Röntgenwellenlänge (SAD-Methode) bzw. bei mehreren Wellenlängen (MAD) wurde eine Reihe neuer Proteinstrukturen aufgeklärt. Ein wichtiges Beispiel stellt die Struktur des Transkriptionsfaktors NusA von Thermotoga maritima dar (Abb. 80), die auf der Grundlage anomaler Streuung an der Se-K-Kante gelöst wurde. Durch die Anordnung multipler Domänen (S1, KH) entsteht eine ausgedehnte Oberfläche für die Bindung von RNA. Durch kooperative Effekte können die Stärke und Spezifizität der RNA-Bindung moduliert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt lag bei der Entwicklung von Verfahren und Techniken zur Automatisierung der Beugungsmessungen und ihrer Auswertung. Damit wurden wesentliche Voraussetzungen für die Lösung von Proteinstrukturen in hohem Durchsatz und damit für Anwendungen in der Strukturgenomik an der Beamline BW6 geschaffen. In einem ersten Schritt sollen vorgefrorene Proteinkristalle automatisch auf ein Diffraktometer transferiert werden. Dazu wurde ein Robotersystem konzipiert, das in Kürze fertig gestellt und installiert werden soll. Ein zweiter Schritt, bei dem der montierte Kristall automatisch identifiziert und in den Röntgenstrahl positioniert wird, wurde bereits abgeschlossen; dieses System wurde schon in Routinemessungen eingesetzt. Ein dritter Schritt, der die Möglichkeit zu automatischer Beugungsdatensammlung sowie zur sofortigen Reduktion der Daten schafft, wurde ebenfalls bereits realisiert. Weitere Schritte, die sich in der Entwicklung befinden, zielen auf eine automatische Beurteilung der Kristallqualität, Wahl der Messstrategie sowie Lösung der Patterson als Basis für automatisierte SAD/MAD-Phasierung; diese Schritte bedürfen bisher der Expertise erfahrener Kristallographen. Es wird erwartet, dass sich die Auswahl geeigneter Kristalle (Screening) sowie die eigentliche Kristallstrukturanalyse für einen erheblichen Teil aller Proteine, die als Targets für Projekte der Strukturgenomik von Interesse sind, automatisieren lässt.

Alle Röntgenbeugungsmessungen wurden an der Beamline BW6 an DORIS durchgeführt, die von MPG und GBF gemeinsam betrieben wird.

Zytoskelett

Die MPG-Gruppe "Zytoskelett" befasst sich mit der Stukturbestimmung von Proteinen des Zytoskeletts mit Hilfe der Synchrotronstrahlung, insbesondere mit der Untersuchung des Struktur-Funktions-Zusammenhangs von Mikrotubuli und Mikrotubuliassoziierten Proteinen. Mikrotubuli sind hohlzylindrische Proteinfasern, die durch spontane Polymerisation von Tubulin entstehen. Sie spielen bei der Organisation zellulärer Strukturen eine wichtige Rolle und sind an vielen dynamischen Prozessen in der Zelle beteiligt.

Es gibt eine große Zahl von Proteinen und Proteinkomplexen, die mit Mikrotubuli assoziiert sind. Von diesen stehen zwei Gruppen im Vordergrund des Interesses: Die erste ist die Gruppe der Motorproteine, die für den Transport zellulärer Bestandteile entlang der Mikrotubuli verantwortlich sind. Zu dieser Gruppe gehören Dynein und die Familie der Kinesine. Die zweite Gruppe sind die so genannten "MAPs" (Mikrotubuliassoziierte Proteine); sie haben hauptsächlich stabilisierende bzw. regulative Wirkung auf das Mikrotubuli-Gerüst der Zelle. Hierzu gehört das Tau-Protein, das eine besondere Rolle bei der Entstehung verschiedener Formen neuronaler Erkrankungen, wie FTDP-17 und Alzheimer-Krankheit, spielt. Neuere Untersuchungen belegen, dass es einen direkten, funktionellen Zusammenhang zwischen den beiden Gruppen, den Motorproteinen und den MAPs, gibt. Dies eröffnet neue Perspektiven für die Erforschung der molekularen Ursachen der genannten Krankheiten.

Konventionelles Kinesin, der Hauptvertreter der Kinesin-Familie, besteht in seiner nativen Form aus zwei schweren und zwei leichten Peptidketten. Jede der beiden schweren Ketten hat an ihrem N-Terminus eine etwa 350 Aminosäuren umfassende, globuläre "Motordomäne". Diese Motordomänen sind für die Interaktion mit den Mikrotubuli und für die Umwandlung chemischer Energie in gerichtete Bewegung (mechanische Arbeit) verantwortlich. Dabei wird die energiereiche Verbindung ATP (Adenosin-tri-phosphat) zu ADP (Adenosin-di-phosphat) und Phosphat hydrolysiert.

Mittlerweile sind Röntgenstrukturen von Motordomänen verschiedener Kinesine bekannt, unter anderem aus konventionellem Kinesin von Mensch und Ratte. Vor kurzem ist es gelungen, die Motordomäne des Pilzkinesins NcKin (Neurospora crassa Kinesin) zu kristallisieren und die Struktur mit Röntgendiffraktion zu bestimmen. NcKin weist gegenüber anderen Kinesinen einige Besonderheiten auf. NcKin hat keine leichten Ketten und bewegt sich drei- bis fünfmal schneller als das konventionelle Kinesin aus tierischen Zellen. Der Vergleich der Struktur des Pilzkinesins mit den bereits bekannten Kinesinstrukturen liefert Hinweise auf den Mechanismus der Motoraktivität von Kinesinen im allgemeinen und auf die Ursachen für die hohe Geschwindigkeit des Pilzkinesins im besonderen: Kleine strukturelle Änderungen in der ATP-Bindungstasche (hervorgerufen durch die Spaltung von ATP in ADP und Phosphat) werden durch ein dynamisches Netzwerk von Salzbrücken auf benachbarte Regionen in der Motordomäne übertragen und verstärkt. Diese Regionen sind einerseits für die Wechselwirkung mit Mikrotubuli und andererseits für die Kommunikation mit der zweiten Motordomäne verantwortlich. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist der Ersatz der Spaltprodukte ADP und Phosphat durch frisches ATP. Im Vergleich mit den anderen Kinesinen hat das schnelle Pilzkinesin eine viel weitere ATP-Bindungstasche. Dadurch kann der Austausch von ADP und ATP schneller erfolgen. Weiterhin trägt vermutlich auch die höhere Beweglichkeit der Region, über die die beiden Motordomänen miteinander kommunizieren, zur Geschwindigkeit des Pilzkinesins bei.

Das Mikrotubuli-assoziierte Protein Tau hat in Lösung keine bestimmte Struktur, die Tau-Moleküle nehmen vielmehr weitgehend zufällige Konformationen an. Das Fehlen einer definierten globulären Struktur führt bei Proteinen häufig zu unerwünschter Aggregation und zur Bildung großer Polymerkomplexe (Fasern), die die Zelle schädigen. Dieser Prozess ist die Grundlage verschiedener Demenzen des Menschen (Beispiel: Alzheimer-Krankheit, Parkinson-Krankheit, Creutzfeld-Jacob-Krankheit) und verwand-



Abbildung 81: Röntgendiffraktion von teilweise orientierten Fasern der Mikrotubuli-Bindungsdomäne des Tau-Proteins (a) und daraus abgeleitete Organisation der für die Aggregation der Tau-Moleküle wesentlichen β -Stränge im Kernbereich der Filamente (b).

ter Erkrankungen bei Tieren (Beispiel: BSE = Rinderwahn). Das hier untersuchte Tau-Protein aggregiert zu paarigen helikalen Filamenten (PHFs) in der Alzheimer-Krankheit, und Mutationen des Tau-Proteins lösen so genannte "frontotemporale" Demenzen aus (FTDP-17). Der Aggregationsprozess konnte in vitro nachvollzogen werden. Dadurch war es möglich, die Struktur der Filamente mit Hilfe der Röntgenfaserdiffraktion zu untersuchen (Abb. 81). Bestimmte Tau-Mutanten der frontotemporalen Demenz neigen besonders stark zur Fibrillenbildung, verglichen mit der langsameren Aggregation des Tau-Proteins bei der Alzheimer-Krankheit. In beiden Fällen liegt aber ein ähnliches Strukturprinzip zugrunde: Das Tau-Protein enthält ein Hexapeptid-Motiv, welches von einer ungeordneten Struktur in die Konformation eines β -Stranges übergehen kann. Die Umwandlung geschieht zunächst spontan in einem ersten, langsamen Prozess (Nukleation), später wird sie beschleunigt durch den Kontakt mit bereits umgewandelten Tau-Molekülen (Polymerisationsphase). Dabei kommt es zur Ausbildung einer β-Faltblatt-ähnlichen, filamentösen Struktur. Eine systematische Untersuchung der Faktoren, die die Aggregation zu Tau-Filamenten begünstigen, könnte dazu beitragen, die Entstehungsursachen der Alzheimer-Krankheit besser zu verstehen und neue Therapieansätze zu entwickeln.

Struktur der Ribosomen

Der genetische Code ist eine Bibliothek von Bauplänen, die die Sequenz von Proteinen beschreibt. Die Übersetzung des genetischen Codes und die Produktion der Proteine wird durch ein universelles Zellorganell, das Ribosom, geleistet.

Das Ribosom besteht aus zwei Untereinheiten, die verschiedene Funktionen im Rahmen der Protein-Biosynthese erfüllen. Die kleine Untereinheit (30S in Prokaryonten, bestehend aus der 16S rRNA und 20 ribosomalen Proteinen) ist für die Übersetzung des genetischen Codes, dessen Blaupause auf der mRNA abgelegt ist, verantwortlich. Die große Untereinheit (50S in Prokaryonten, bestehend aus 5S rRNA, 23S rRNA und 33 ribosomalen Proteinen) fügt die einzelnen Aminosäuren zu einer langen Peptid-Kette entsprechend dem Bauplan zusammen. Aufgrund der zentralen Rolle des Ribosoms in der Protein-Biosynthese ist das Ribosom zugleich das primäre Target der meisten Antibiotika.

Im Jahr 2000 konnte die Struktur der 30S ribosomalen Untereinheit von Thermus thermophilus bei einer Auflösung von 3.3 Å röntgen-kristallographisch aufgeklärt werden und im Folgenden bis zu einer Auflösung von 3.1Å verfeinert werden. Darauf basierend konnte die Arbeitsgruppe Komplexe der 30S Untereinheit mit dem Initiationsfaktor IF3 sowie zwei Antibiotika, Tetracyclin und Edeine, aufklären.

Der Initiationsfaktor IF3 erfüllt wesentliche Funktionen in der Initiationsphase der Protein-Biosynthese. Zu diesem Zeitpunkt sind die 30S und 50S Untereinheiten getrennt, die mRNA wird in die 30S Untereinheit eingefädelt und die Initiationsfaktoren IF1-3 sowie die Initiator-tRNA werden angelagert. IF3 stellt sicher, dass keine vorzeitige Bindung der ribosomalen Untereinheiten stattfindet und die mRNA mit dem korrekten Start-Codon eingebaut wird. Die Kristallstruktur des Komplexes der 30S Untereinheit mit IF3 konnte einige der Funktionen von IF3 auf struktureller Ebene verständlich machen.

Tetracyclin war das erste Breitband-Antibiotikum, das entdeckt wurde, und ist noch immer eines der am weitesten verbreiteten Antibiotika, obwohl Resistenzen gegen Tetracyclin den Anwendungsbereich in den vergangenen Jahren dramatisch eingeschränkt haben. Tetracyclin war bekannt dafür, ein so genannter "A-site-inhibitor" zu sein, also die Bindung von tRNA an der "A-site" zu unterbinden und dadurch die Protein-Biosynthese zum Erliegen zu bringen. Die Struktur des 30S-Tetracyclin Komplexes zeigt, dass für die Wirkung von Tetracyclin eine Bindungsstelle verantwortlich ist, die mit der Bindungsstelle der tRNA übereinstimmt und so die Blockade des Ribosoms verursacht. Daneben wurden sechs weitere Bindungsstellen von Tetracyclin gefunden, die aber in erster Linie die Konstituierung des Ribosoms beeinflussen und keine direkte bakterizide Wirkung entfalten.

Edeine ist ein universelles Antibiotikum. Es unterbindet also im Gegensatz zu Tetracyclin, das nur an bakteriellen Ribosomen seine Wirkung entfaltet, die Protein-Biosynthese in jeder Zelle unabhängig von ihrem phylogenetischen Ursprung. Aus diesem Grunde ist Edeine kein Antibiotikum pharmazeutischer Relevanz, aber wegen seiner Universalität ein ausgezeichnetes Modell, um allgemeine Aspekte der Protein-Biosynthese zu untersuchen. Die Untersuchung des 30S-Edeine Komplexes hat gezeigt, dass Edeine – wenig überraschend – in einer universell konservierten Region des Ribosoms bindet, die durch dynamische Konformations-Änderungen direkt an der Initiation beteiligt ist. Edeine unterbindet diese Konformations-Änderungen und bewirkt damit einen Stillstand des Prozesses. Darüber hindus blockiert Edeine den Pfad der mRNA und verhindert die korrekte Positionierung der Initiator-tRNA auf der kleinen ribosomalen Untereinheit.

Ebenfalls im Jahr 2000 wurde die Struktur der 50S ribosomalen Untereinheit von Haloarcula marismortui publiziert. Dieser Organismus ist zum einen wenig geeignet, um die Wechselwirkung des Ribosoms mit Antibiotika zu untersuchen, zum anderen führen die Kristallisationsbedingungen zu einem inaktiven Ribosom. Das hat unter anderem zu einem inkorrekten Modell für die katalytische Aktivität der 50S Untereinheit geführt. In 2001 konnte die Arbeitsgruppe aber die Struktur der 50S ribosomalen Untereinheit von Deinococcus radiodurans (Abb. 82 links) aufklären. Dieses Bakterium, das seinen Namen einer extremen Stabilität gegenüber radioaktiver Strahlung verdankt, bietet ein nahezu perfektes Modell-System, um die Ribosomen-Antibiotika-Wechselwirkungen zu untersuchen. Als Folge konnten die Strukturen von therapeutisch wichtigen Antibiotika wie Clindamycin, Chloramphenicol und Erythromycin im Komplex mit der 50S ribosomalen Untereinheit ermittelt werden.

Chloramphenicol ist sehr wirkungsvoll in der Behandlung eines breiten Spektrums bakterieller Infektionen, einschließlich schwerer anaerober Infektionen. Clindamycin wird unter anderem zur Bekämpfung anaerober Infektionen und Cocci-Bakterien sowie zur Behandlung von Pneumocystis induzierter Lungenentzündung von AIDS-Patienten verwendet. Beide Antibiotika binden direkt im Peptidyltransferase-Zentrum des Ribosoms. Die Strukturen der ribosomalen Untereinheit mit Clindamycin und Chloramphenicol bestätigen die Vermutung, dass diese Antibiotika die Protein-Biosynthese durch "molekulare Mimikry" unterbrechen: Sie besetzen nämlich Bereiche, die denen von zelleigenen Aminosäuren ähnlich sind, und werden deshalb durch das Ribosom gebunden. Da sie aber naturgemäß keine Peptidbindung eingehen können, bringen sie die Peptidyltransferase-Reaktion zum Stillstand.

Die so genannten Makrolide-Antibiotika, deren bekanntester Vertreter Erythromycin ist, werden zur Bekämpfung einer Vielzahl bakterieller Infektionen verwendet. Anhand biochemischer Daten war bereits bekannt, dass Erythromycin die Peptidyltransferase-Reaktion erst nach der Bildung einer kurzen Aminosäurekette unterbindet. Die Struktur der 50S Untereinheit im Komplex mit Erythromycin sowie mit den



Abbildung 82: Links: Die 50S ribosomale Untereinheit von Deinococcus radiodurans. Rechts: Der Blick durch den Tunnel der 50S ribosomalen Untereinheit, blockiert durch Erythromycin (als oranges Kugelmodell). Die ribosomale RNA ist in blau dargestellt, die ribosomalen Proteine in gelb.

zwei anderen Makroliden (Roxithromycin und Clarithromycin) zeigt, dass diese Klasse der Antibiotika den Tunnel der 50S Untereinheit blockiert, durch den alle Proteine hindurchgefädelt werden (Abb. 82 rechts). Dies führt zu einem vorzeitigen Abbruch der Protein-Biosynthese.

Der größte Teil der Antibiotika wird heute nicht zur Behandlung bakterieller Infektionen eingesetzt, sondern in der Tiermast (bis zu 80% der weltweit produzierten Antibiotika), zur Produktion und Konservierung von Nahrungsmitteln und vielen anderen mehr oder minder sinnvollen Anwendungen.

Als unmittelbare Folge sind viele bakterielle Erreger in zunehmendem Maße multi-resistent gegen eine große Zahl verschiedener Antibiotika. Üblicherweise vergehen nicht mehr als ein bis zwei Jahre nach der Einführung eines neuen Antibiotikums, bis die ersten resistenten Erreger auftreten. Die Entwicklung neuer Antibiotika kann daher mit der zunehmenden Verbreitung resistenter Bakterienstämme kaum Schritt halten: In den letzten 30 Jahren ist nur eine neue Wirkstoffklasse auf den Markt gekommen.

Die Aufklärung der Struktur der großen ribosomalen Untereinheit in Verbindung mit verschiedenen Antibiotika, und damit die Kenntnis der Wechselwirkung zwischen Antibiotika und Ribosomen, erlaubt es nunmehr, die langwierige und kostenintensive Entwicklung neuer Medikamente deutlich zu beschleunigen bzw. zu vereinfachen.



Abbildung 83: Datennahme- und Verarbeitungselektronik des Si-Driftdetektorsystems. (Links VME-Crate, rechts Front End Crate).

Elektronik-Entwicklung

Zur Abteilung "Elektronik-Entwicklung" (FE) gehören die Gruppen für digitale Datenverarbeitung (FEA), analoge Signalverarbeitung (FEB), Optound Mikroelektronik (FEC), spezielle Softwareentwicklungen (FEE) sowie die Service-Gruppe (FEPOS).

Projekte

ZEUS Luminositäts-Monitor

Das ZEUS-Experiment misst die Luminosität der ep-Kollisionen mit der Abstrahlung eines Photons unter sehr kleinem Winkel. Dieses Photon wird mit einem Kalorimeter nachgewiesen, das mit Photovervielfachern ausgelesen wird. Das Integral des Pulses ist proportional zur Energie des Photons. Da sich alle 96 ns die Elektronen- und Protonenpakete kreuzen, muss innerhalb dieser Zeit ein möglichst langes Intervall integriert und mit 12 Bit Auflösung digitalisiert werden. Anschließend muss in möglichst kurzer Zeit wieder der Anfangszustand erreicht werden, da hiervon die Messgenauigkeit entscheidend bestimmt wird.

Abbildung 84 zeigt eine zugehörige Messung: Das Integral des 13 ns langen Eingangspulses, ein 60 ns Plateau über den Rest des 73 ns langen Integrationsintervalls und einen steilen Abfall (< 20 ns) auf einen kleinen Restwert. Die durchlaufend flache Kurve wurde bei offenem Eingang gemessen, während auf dem unteren Kanal das digitale Steuersignal des Zeitfensters der Entladung dargestellt ist. Das Nullniveau (Pedestal) wird bei etwa 10% des vollen Bereichs eingestellt (innerhalb bauteilbedingter Streuungen). Die Linearität wurde zu besser als 1% gemessen, wobei dieser Wert durch die Ungenauigkeit des verwendeten Eingangssignals dominiert wird.



Abbildung 84: Oszillogramm des Integratorausgangs.

Die Entwicklung und Serienproduktion dieser Integrator-Module wurde von der Gruppe FEB abgeschlossen und 196 Platinen an das ZEUS-Experiment ausgeliefert. Der Serientest ergab, dass alle Module die Spezifikationen einhalten. Hierbei wurde als wichtiges Qualitätsmerkmal der Module die Rückkehrabweichung gemessen. Dazu wird das Verhältnis aus dem Restsignal zu Beginn der neuen Integration und dem Nutzsignal, jeweils abzüglich des Pedestals, bestimmt.

Abbildung 85 zeigt diese Häufigkeitsverteilung für alle 196 Module. Der gemessene Mittelwert von 1.2% ist wiederum durch das Eingangssignal dominiert.

Die Ausgangssignale dieser Integrator-Baugruppen werden von Modulen weiterverarbeitet, die von der Gruppe FEA entwickelt wurden. Es handelte sich hierbei um Memory-Module (VME-Karten), Pipelines und Speicher (Mezzanine-Module), Backplane (zwischen Memory- und Trigger-Boards) sowie Testadapter für die Mezzanine-Kommunikations-Module. Die Vorserienmodule wurden intensiven Systemtests unterzogen,



Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung der Rückkehrabweichung der Integrator-Module.

um vor allem das Zusammenspiel mit der restlichen, von der ZEUS-Kollaboration entwickelten Elektronik zu optimieren. In die endgültige Serienproduktion floss noch eine Reihe von Weiterentwicklungen ein. Die Serientests an der verbesserten Version verliefen erfolgreich, so dass die gesamte Serie gegen Ende des Jahres bei ZEUS in Betrieb genommen werden konnte.

H1 Timing Modul

Für das H1-Experiment entwickelte die Gruppe FEA ein universelles schnelles Timing-Modul, mit dem Ein- und Ausgangssignale auf unterschiedlichste Art verknüpft werden können. Im Wesentlichen besteht das Modul aus einem 8×8 Kreuzschienenverteiler, auf dessen acht Ausgänge sich unter Programmkontrolle verschiedene Datenquellen schalten lassen, deren Pulse dann jeweils noch in Schritten von 0.5 ns bis zu etwa 1 µs verzögert werden können. Bei den Datenquellen handelt es sich um

- einen von acht Frontplatteneingängen, der auch um eine programmierbare Anzahl von HERA-Pulsen verzögert werden kann,
- die Rückkopplung eines beliebigen Ausgangs,
- einen programmierbaren Puls (VME),

- einen programmierbaren Oszillator,
- den Ausgang eines programmierbaren Rauschgenerators.

Der Prototyp dieses Moduls wurde gefertigt und befindet sich zurzeit bei H1 im Test.

Transientenrekorder

Um bei HERA oder TTF die Ursache für Fehlerzustände eindeutig erkennen zu können, wurde in den vergangenen Jahren von den Gruppen FEB und FEA ein Transientenrekorder-System zur Erfassung schneller analoger und digitaler Signale entwickelt. Das System erfasst Messwerte synchron an weit verstreuten Messorten im Bereich des gesamten Beschleunigers und legt die Messungen in einem Archiv ab.

Die Signale werden direkt vor Ort von Tastköpfen mit einer Auflösung von 12 Bit und einer einstellbaren Taktrate von maximal 100 kHz konvertiert. Die Datenerfassung und die Datenablage in einen 8 k tiefen Speicher sind in ihrem Potential entkoppelt. Die Daten werden während der Einlese auf Besonderheiten analysiert, und damit wird gegebenenfalls eine Übertragung aller Messungen in das Archiv ausgelöst. Die Analysemöglichkeiten wurden im letzten Jahr auf Anforderung der Gruppe MKK und im Hinblick auf zukünftige Erweiterungen für die Überwachung der Klystrons deutlich ausgeweitet und verbessert.

E-Alarmsystem für HERA

Die Temperaturüberwachung für HERA-e wurde auf Wunsch der Gruppe MPY zu einem Alarmsystem für HERA-e ausgebaut. Nach der Luminositätserhöhung müssen nicht nur die Temperaturen einiger Teile des HERA-Beschleunigers ständig überwacht werden, um bei Übertemperatur den Elektronenstrahl abzuschalten und so die Experimentieranlagen zu schützen, sondern auch diverse Messsignale der Experimente.

Das für die Gruppe MPY entwickelte Elektroniksystem, bei dem die Strahlenresistenz, der Messbereich bis 500°C, die Wartbarkeit, die sichere Datenübertragung über lange Strecken, die einfache Montage und die Ausfallsicherheit von großer Bedeutung sind, wurde zu einem Alarmsystem ausgebaut. Etwa 160 Temperaturen in der Nähe der Wechselwirkungspunkte und weitere 5 bis 9 Signale in den Hallenkontrollräumen werden dezentral von fünf Server-Rechnern erfasst. Überschreitet ein Signal die einstellbare Schwelle, so wird dieser Alarmzustand gespeichert, bis der Zustand vom Kontrollsystem zurückgesetzt wird. Tritt bei mehreren Kanälen der Alarmzustand auf, so wird die Reihenfolge der Alarme festgehalten.

Die Alarmweiterschaltung erfolgt mit Relaisketten, unter Ausnutzung von vorher unbenutzten Kabeln von HERA-p. In der Halle West wird aus diesen Alarmen ein Sammelalarm gebildet. Dieser wird wiederum mit eventuellen schnelleren Alarmsignalen von den Experimenten und dem Kontrollraum zusammengeschaltet und direkt zum Elektronenstrahl-Dump weitergeleitet.

Die Daten werden über die erwähnten Computer von einem Client-Rechner von der Gruppe MST ausgelesen. Dabei kann auf den aktuellen Alarmzustand, die aktuellen Temperaturen oder auf archivierte Daten zugegriffen werden.

Das System ist im Einsatz. Eventuell soll ein spezieller Kartentyp durch eine ausfallsicherere Variante ersetzt werden. Prototypen sind bereits getestet.

Si-Driftdetektorsystem

Die Gruppe FEC hat im Berichtsjahr die Datennahmeund Datenverarbeitungselektronik für den Betrieb des Si-Driftdetektorsystems fertig gestellt. Detaillierte Beschreibungen zu den entwickelten System-Baugruppen lieferten die Berichte der vorangegangenen Jahre. Abbildung 83 zeigt die Anordnung des Steuerrechners (VME Controller), des Empfängers des optischen Links (Rx) und des Multikanalanalysators (MCA) innerhalb des VME-Überrahmens (VME Crate) sowie der A/D-Wandler-Baugruppe (ADC), des Senders des optischen Links (Tx) und eines Transceivers des optischen Steuersystems (Ry) innerhalb des detektornah platzierten Tischgerätes (Front-End Crate). Der zweite Transceiver des optischen Steuersystems in Form einer PCI-Aufsteckkarte befindet sich auf dem VME Controller. Beide Rahmeneinheiten können über Monomodefasern einer Länge von bis zu 15 km miteinander kommunizieren. Das Tischgerät enthält unter anderem die Spannungs-Versorgungen für sämtliche Baugruppen (Crate Power und Crate Power Control) sowie die Eingänge für alle notwendigen Detektorspannungen (Detector Power Input). Die rechnergestützte Systemsteuerung, Messwertauslese, -verarbeitung und -visualisierung erfolgt mit Hilfe eines WindowsNT-PC und der graphikorientierten Programmiersprache AgilentVee 5.0. Der VME Controller arbeitet unter dem Betriebssystem Linux. Alle nötigen Kommandos zum Betrieb des Systems werden von ANSI-C Programmen ausgeführt, die auf einer Festplatte im VME-Überrahmen gespeichert sind (HD).

Die für 2001 angekündigten Systemtests und Weiterentwicklungen der Software wurden abgeschlossen. Im Rahmen mehrerer ausgedehnter Systemtests (Messzyklen von mehr als 17 Stunden) wurde der Dynamikbereich der A/D-Wandler-Kanäle von ± 1.5 V in mV-Schritten durchfahren. Etwa 10 Millionen Abtastwerte pro Inkrement dienten der spektralen Auswertung mit dem Multikanalanalysator. Die Standardabweichung der gemessenen Linien übersteigt für keinen der Kanäle den Wert von 0.7 LSB (nominelle 12 Bit Auflösung). Die integrale Nichtlinearität bleibt unterhalb von ± 0.4 LSB.

Darüber hinaus wurde das Gesamtsystem zur Charakterisierung eines 6-kanäligen Prototyps der integrierten Ausleseelektronik eingesetzt. Der ASIC dient der Verstärkung und Filterung der analogen Detektorsignale sowie der Erzeugung eines seriellen Impulsstroms zur anschließenden A/D-Wandlung. Mit Hilfe einer ⁵⁵Fe-Quelle und eines 7-zelligen Si-Driftdetektors wurden bei Raumtemperatur und 20 000 Einträgen pro Sekunde Linienbreiten von 260 eV (FWHM) erzielt. Messungen mit Hilfe eines Signalgenerators führten auf eine eingangsäquivalente Rauschladung von nur 19 Elektronen RMS bei einer Ereignisrate von etwa 7 kHz.

Eine weitergehende Charakterisierung hinsichtlich des Ablage-, Verstärkungs-, Linearitäts- und Übersprechverhaltens sowie die Fertigstellung 30-kanäliger Schaltkreise für die Detektormodul-Integration und erste Demonstrationen des 61-kanäligen Detektormoduls sind für das kommende Jahr geplant.

Verschiedene Entwicklungen

Mit der Gruppe FDET wird an der Automatisierung der longitudinalen Emittanz-Messung bei TTF gearbeitet. Die Gruppe FEB war am Aufbau einer Regelung zur Synchronisation eines Laserpulses zu Diagnostikzwecken beteiligt. Ziel ist es, den Zeitpunkt des Laserpulses relativ zum 1.3 GHz Beschleunigungsfeld auf etwa 1 ps zu synchronisieren. In Zusammenarbeit mit FDET wurden Messungen zur Systemcharakterisierung durchgeführt und mehrere Vorschläge zur Realisierung erarbeitet, die sich zurzeit in der Prototypfertigung befinden.

Ein System zur Messung der Strahlverluste mit automatischer Schnellabschaltung des Strahls und integriertem "Post Mortem" Speicher für TTF2 befindet sich zurzeit in der Definitionsphase. Hier arbeitet FEB mit der Gruppe MDI zusammen.

Die Gruppe FEA hat die Entwicklung eines Clock-Generators für die Messung von Multibunch-Schwingungen für die Gruppe MPY weitergeführt. Im Rahmen dieser Entwicklung wurden zusätzlich viele Untersuchungen zum Test der neu erworbenen Software-Pakete und zum Erstellen der benötigten Infrastruktur durchgeführt. Eine verbesserte Version des Moduls wird derzeit getestet.

Die Gruppe FEC hat die Entwicklung der Ausleseelektronik für die rückwärtige Proportionalkammer des H1-Experimentes abgeschlossen und die Komponenten ausgeliefert.

Die Software für die Strahlenschutzüberwachungsanlage am Photo-Injektor PITZ in Zeuthen wurde erweitert und ermöglicht nun mehreren Clients den gleichzeitigen Zugang zu den aktuellen Detektor-Daten.

Service-Tätigkeiten

Die Service-Gruppe FEPOS hat im Jahr 2001 insgesamt 750 elektronische Geräte für verschiedene Gruppen bei DESY repariert. Davon sind etwa zwei Drittel EDV-Komponenten und Peripheriegeräte. Weitere Aufgaben dieser Gruppe sind der Geräteverleih im Rahmen des Elektronik-Pools sowie die Verwaltung der Altgeräte und die damit verbundene Organisation einer sinnvollen Verwertung von alter Elektronik. Die technische Betreuung der Hörsäle und Seminarräume gehört ebenfalls zu den Tätigkeiten. In Zusammenarbeit mit der Gruppe FEA sind dort notwendige Erweiterungen und Modernisierungen in der Audio- und Videotechnik erfolgt. Zwei Mitarbeiter arbeiten eng mit der IT-Abteilung im Z-Bereich zusammen. Schwerpunkte hierbei sind die Unterstützung der Administratoren in der Verwaltung und umfangreiche Hardware-Tests im Auftrag des Komitees für Standardisierung der PC-Hardware und Peripherie sowie des Rechnerkomitees.

FEPOS betreut einen Auszubildenden und mehrere Praktikanten, FEA unterrichtet einen Umschüler in der Software-Entwicklung für Anwendungen.

Im Berichtsjahr wurden wiederum zwei Mitarbeiter von FEA abgestellt für Tätigkeiten bei H1. Ein anderer Mitarbeiter war wieder vollständig für ZEUS tätig. Er führte im Rahmen der Projekte Micro-Vertex-Detektor und Micro-Computer Executive (MCX) eine ganze Reihe von Hardware-Verbesserungen durch und übernahm die Betreuung der Komponenten.

Zusätzlich wurde noch ein Interface für die Datenübertragung im Rahmen einer Detektorentwicklung zur Messung hochenergetischer Neutronen entwickelt.

Die Gruppe FEA betreibt das Elektronik-Entwicklungs-System von der Firma Mentor Graphics und betreut die Anwender bei FE und auch bei anderen DESY-Gruppen. Im Berichtsjahr wurden außerdem umfangreiche Untersuchungen zum Test neu erworbener Software-Module und zur Einrichtung der benötigten Infrastruktur durchgeführt.

Neben der eigentlichen Entwicklungstätigkeit wurden von der Gruppe FEA umfangreiche Layoutarbeiten für verschiedene Gruppen (in erster Linie FEB) geleistet, unter anderem Clock-Generatoren, PC104 Carrier Adapter, Vorverstärker und Verstärker für Ionisationskammern, diverse Backplanes und weitere Baugruppen.
Bibliothek und Dokumentation

Die Gruppe "Bibliothek und Dokumentation" sammelt die von den DESY-Mitarbeitern benötigte Fachliteratur, insbesondere zur Teilchenphysik, Quantenfeldtheorie und Beschleunigertechnik. Neuerscheinungen werden schnellstmöglich beschafft, katalogisiert und zur Benutzung bereitgestellt.

Die gesamte Literatur zur Hochenergiephysik wird in enger Zusammenarbeit zwischen den Bibliotheken des Stanford Linear Accelerator Center SLAC und DESY dokumentarisch bearbeitet und in der Literaturdatenbank HEP (High Energy Physics), die Dokumente ab Anfang der siebziger Jahre enthält, bereitgestellt. Sie wird täglich aktualisiert und ist im World Wide Web (WWW) zugänglich.

Die Zentralbibliothek in Hamburg und die Bibliothek von DESY Zeuthen informieren ihre Benutzer elektronisch im WWW des Internet. Die Zentralbibliothek informiert darüber hinaus über die Neuerwerbungen der Bibliotheken von DESY Hamburg in den gedruckten "Bibliotheksmitteilungen".

Die Gruppe verwaltet auch das Berichts- und Veröffentlichungswesen von DESY und nimmt die Aufgaben des "Verlags Deutsches Elektronen-Synchrotron" wahr.

Die DESY-Zentralbibliothek ist anerkannte Ausbildungsstelle für Fachangestellte für Medien- und Informationsdienste der Fachrichtung Bibliothek und stellt Praktikumsplätze für Studenten des Bibliothekswesens zur Verfügung. Schülerinnen und Schüler des 10. und 11. Schuljahres werden in Betriebs- und Berufspraktika in die bibliothekarische Arbeitswelt eingewiesen. In der Teilgruppe "Dokumentation" machen Diplom-Physiker/innen seit 1992 den berufspraktischen Teil der zweijährigen Ausbildung zu Wissenschaftlichen Dokumentaren. Die Gruppe "Bibliothek und Dokumentation" ist korporatives Mitglied in der Arbeitsgemeinschaft der Spezialbibliotheken (ASpB) im Deutschen Bibliotheksverband (DBV), im Arbeitskreis Bibliotheks- und Informationswesen der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF), in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) und in der Gesellschaft für Informatik (GI).

Bibliotheken

DESY hat neben der Zentralbibliothek eine Institutsbibliothek bei DESY Zeuthen, eine Bibliothek im Hamburger Synchrotronstrahlungs-Labor HASYLAB und eine Abteilungsbibliothek der Arbeitsgruppe MKS. Ungefähr 27 150 Bücher wurden Ende 2001 über den gemeinsamen OPAC (Online Public Access Catalogue) nachgewiesen.

Die Institutsbibliothek im HASYLAB sammelt im Wesentlichen Literatur zur Festkörperphysik. Der Bestand umfasst etwa 1220 Bücher (ohne Zeitschriftenbände). Erwerbung und Katalogisierung werden von der Zentralbibliothek durchgeführt. Für die Benutzung gelten laborinterne Regelungen.

Die Bücherei der Abteilung MKS enthielt Ende 2001 etwa 190 Monographien und Lehrbücher zur Tieftemperatur-/Kältetechnik und zur Vakuumtechnik. Die Benutzung ist auch dort intern geregelt.

Alle Aufgaben der früheren Verwaltungsbücherei werden von der Zentralbibliothek wahrgenommen.

Zentralbibliothek

Im Berichtsjahr benutzten etwa 1700 Leser regelmäßig die Zentralbibliothek. Sie entliehen durchschnittlich

	Zugang	Löschungen	Bestand
			(31.12.2001)
Monographien	1636	435	28 944
Gebundene Zeitschriftenbände	1504	1258	27 161
Laufend gehaltene Zeitschriften	14	8	407*
Zeitschriften (Verwaltung)	1	-	32**
elektronische Zeitschriften	407	-	1011

* zzgl. 21 Abonnements von Tages-/Wochenzeitungen
** davon 12 Abonnements von Zeitungen

Tabelle 1: Entwicklung des Bibliotheksbestands in 2001.

100 Medien (Bücher, Videos, CDs usw.) pro Woche. Im nehmenden Leihverkehr wurden 466, im gebenden 165 Literaturbestellungen positiv bearbeitet. 542 Medien gingen ohne Inventarisierung als Verbrauchsmaterial direkt in die Abteilungen bzw. Gruppen.

Die Entwicklung des Bibliotheksbestands im Berichtszeitraum zeigt Tabelle 1.

Forschungsberichte und Vorabdrucke mit Themen zur Elementarteilchenphysik werden seit 1993 aus verschiedenen Volltextdatenbanken übernommen und auf einem UNIX-Server des Rechenzentrums gespeichert. Von diesen "Electronic Preprints" werden keine gedruckten Exemplare in die Berichtssammlung aufgenommen.

Für die von Verlagen angebotenen elektronischen Versionen von Zeitschriften erstellt die Zentralbibliothek bequeme Zugriffsmöglichkeiten auf ihren WWW-Seiten.

Der HGF-Arbeitskreis Bibliotheks- und Informationswesen führte auch im Jahr 2001 für die HGF-Einrichtungen Verhandlungen mit Verlagen, Agenturen und Informationsdienstleistern über Konsortialverträge für den gemeinsamen Zugang zu den elektronischen Versionen der abonnierten Zeitschriften und zu Literaturund Faktendatenbanken. Mit mehreren Verlagen und Informationsanbietern wurden im Berichtsjahr die Verhandlungen erfolgreich abgeschlossen. Insgesamt konnte zum Ende des Jahres auf die Inhaltsverzeichnisse, Kurzfassungen und Volltexte der Veröffentlichungen in 1011 elektronischen Zeitschriften zugegriffen werden.

Die Büchersammlung der Zentralbibliothek wird seit Anfang 2001 reorganisiert: Alle Wörterbücher sind nunmehr Präsenzbestand. Die Literatur zu Astronomie, Astrophysik und Kosmologie erhielt eine eigene Systematikstelle. Die populärwissenschaftlichen Bücher haben nunmehr einen separaten Standort; viele Bücher aus der Infothek der DESY-EXPO 2000 sind in dieser Sammlung zu finden.

Die Zentralbibliothek hat seit Gründung der Außenstation Hamburg des "Europäischen Molekularbiologischen Laboratoriums" (EMBL) dessen Zeitschriften verwaltet. Da das EMBL seit kurzem eine eigene Bibliothek auf dem DESY-Gelände hat, wurden dessen Bestände im Berichtsjahr aus der Zentralbibliothek dorthin überführt.

Die Zentralbibliothek und die Bibliothek von DESY Zeuthen arbeiten mit der integrierten Bibliothekssoftware ALEPH-500. Im Berichtsjahr wurden die Module Erwerbung, Katalogisierung und Ausleihe eingesetzt.

Bibliothek von DESY Zeuthen

Diese Bibliothek wird von 250 Lesern regelmäßig genutzt. Sie konnten sich Ende des Berichtsjahres aus 8768 Monographien und 8099 Zeitschriftenbänden informieren. 90 Zeitschriftentitel sind abonniert. Im Jahr 2001 wurden etwa 215 Literaturstellen im nehmenden Leihverkehr besorgt, 61 davon von der Zentralbibliothek in Hamburg.

In der Bibliothek des DESY Zeuthen wurden Altbestände zu Astronomie, Astrophysik und Kosmologie in den Sammelgebieten Physik und Naturwissenschaften bereits vollständig in die entsprechende neue Sammlung überführt.

Berichts- und Veröffentlichungswesen

Im Jahr 2001 wurden 226 DESY-Berichte, 51 Dissertationen, 11 Diplomarbeiten und 12 Interne Berichte gedruckt und 169 Arbeiten in Fachzeitschriften unter Beachtung der DESY-Publikationsordnung veröffentlicht. Die Übertragung der elektronisch lesbaren Versionen der DESY-Berichte in die e-Print-Archive arXiv.org wurde überwacht.

Seit Februar 2001 gibt es den "Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron". In ihm erschienen der "TESLA Technical Design Report" und die Abhandlungen des DESY-Symposiums "Discovery of Quantum Mechanics" in Verbindung mit dem Katalog der DESY-Ausstellung "100 Jahre Wirkungsquantum".

Die Verlage der Forschungszentren Jülich und Karlsruhe und des DESY präsentierten ihre Verlagsprodukte auf einem gemeinsamen Stand der 53. Frankfurter Buchmesse.

Dokumentation

Die Teilgruppe "Dokumentation" stellt die von den DESY-Mitarbeitern und den bei DESY tätigen Gästen benötigte Literatur- und Fakteninformation in elektronischer Form zur Verfügung. Sie pflegt das integrierte Bibliothekssystem ALEPH und die Web-Seiten der Zentralbibliothek.

Literaturdatenbank HEP

Die Literaturdatenbank HEP wird gemeinsam mit der SLAC-Bibliothek, der weitere Fachbibliotheken weltweit zuarbeiten, erstellt. Im Jahr 2001 hat die Teilgruppe "Dokumentation" für die Datenbank HEP 7030 Publikationen in Fachzeitschriften und Konferenzabhandlungen und 12857 Forschungsberichte und Vorabdrucke klassifiziert und indiziert. Von weiteren 7842 Publikationen und 1154 Forschungsberichten wurden, um sie in der Datenbank schnell nachzuweisen, zunächst nur die bibliographischen Angaben erfasst. Für 8524 bereits dokumentierte Berichte wurden nach ihrer Veröffentlichung Publikationsvermerke hinzugefügt.

Im Berichtsjahr sind die Daten von etwa 10000 Zeitschriftenartikeln der Jahre 1969-1973 aus DESY-Beständen in die Datenbank geladen worden.

Die Datenbank ist mit Installationen in den USA (SLAC), Europa (DESY, Durham und Serpukhov) und Japan (KEK) über das WWW weltweit recherchierbar und bietet Links zu elektronisch angebotenen Kurzfassungen und Volltexten.

Die Schlagwörter, die eine besonders effiziente Literatursuche ermöglichen, werden ergänzt, sobald die Veröffentlichungen bei DESY dokumentarisch bearbeitet worden sind.

Bei der Katalogisierung von elektronisch verfügbaren Artikeln werden zunehmend die Daten der Verlage ausgewertet. Zur Zeit werden die Inhaltsverzeichnisse von 110 Zeitschriften und, soweit verfügbar, von Konferenz-Proceedings halbautomatisch recherchiert. Für bereits in der Datenbank vorhandene Artikel (zum Beispiel Preprints) werden Publikationsvermerke gemacht. Die bibliografischen Daten nicht vorhandener Artikel werden, so weit wie möglich automatisch, in die Datenbank übernommen, und es werden Links zu den Artikeln auf den Servern der Anbieter gesetzt. Viele Zeitschriftenartikel und Konferenzvorträge sind deshalb schon vor Erscheinen der gedruckten Version in der HEP-Datenbank nachgewiesen.

Die erforderlichen Programme für die Auswertung der Daten, deren Formate bei den einzelnen Anbietern und Zeitschriften sehr unterschiedlich sind, werden erstellt und ständig an die häufig wechselnden Formate der Anbieter angepasst.

Informationsangebot

Der Zugriff auf die Literaturdatenbank HEP ist über das WWW möglich. Auf die DESY-residenten Daten wurde im Jahr 2001 mit 617 000 Recherchen zugegriffen.

Die Volltexte von 92 000 Vorabdrucken, Doktor- und Diplomarbeiten und Konferenzbeiträgen, die auf dem Preprint-Archiv der Bibliothek gespeichert sind – etwa 10 GByte Daten – können von verschiedenen Stellen der Web-Seiten der Bibliothek eingesehen werden. Verweise auf die Volltext-Archive der Maschinengruppen und des Linear-Collider-Projektes werden angeboten.

Außerdem wurde eine einheitliche Zugriffsmöglichkeit über die Berichtsnummer erstellt. Für Anfragen von außerhalb DESY wurde eine Möglichkeit geschaffen, den DESY-Firewall zu umgehen.

Wesentliche Vorbereitungen für die Migration des Bibliotheks-Webservers und des Volltext-Archivs auf eine bibliothekseigene Maschine ohne Firewall wurden im Berichtsjahr geschaffen.

Über die Web-Seite der DESY-Bibliothek erhält man auch Zugang zum gemeinsamen Online-Katalog aller Bibliotheken am DESY (2001 mit 11 200 Katalogrecherchen genutzt), zu den Neuzugangslisten der Bücher und Berichte, zum Zeitschriftenverzeichnis der Zentralbibliothek, zu den Inhaltsverzeichnissen und Volltexten der abonnierten elektronischen Zeitschriften und zur Konferenzen-Datenbank.

Die Zentralbibliothek vermittelte weiterhin den Zugang zu den Datenbanken des Fachinformationszentrums Energie, Physik, Mathematik in Karlsruhe und zum Fachinformationszentrum Technik in Frankfurt. Hauptnutzer des FIZ Karlsruhe/STN waren Mitarbeiter am HASYLAB, des FIZ Frankfurt die Gruppe Konstruktion. Seit August 2001 kann von DESY aus in der Literaturdatenbank MathSciNet recherchiert werden. Sie enthält alle Publikationen zur Mathematik seit 1940.

Ausbildung

Seit 1983 bildet die Zentralbibliothek zum Beruf "Fachangestellte/r für Medien- und Informationsdienste, Fachrichtung Bibliothek" (bis 1998 Assistent/in an Bibliotheken) aus. Im Berichtsjahr waren zwei Auszubildende im dritten Lehrjahr, eine weitere beendete ihre Ausbildung Ende August.

Während der dreijährigen Ausbildung werden Praktika bei den Hamburger Öffentlichen Bücherhallen, einer Universitätsbibliothek, einem Archiv oder einer Bildagentur, einer anderen Dokumentationseinrichtung oder einem Verlag sowie bei einem Buchbinder absolviert.

Bereits seit über 30 Jahren bildet die Bibliothek künftige Diplom-Bibliothekare in den von ihren Hochschulen vorgeschriebenen Praktika aus. Eine Studentin des Fachbereichs Bibliothek und Information der Fachhochschule Hamburg verbrachte im Sommer 2001 drei Monate ihres Praxissemesters in der Zentralbibliothek. Im Berichtsjahr wurde eine schriftliche Facharbeit zur Diplomprüfung betreut.

Seit 1992 arbeiten Diplom-Physiker während ihrer berufsbegleitenden Ausbildung zu "Wissenschaftlichen Dokumentaren" zwei Jahre lang als wissenschaftliche Mitarbeiter/innen in der DESY-Dokumentation. Im Berichtsjahr machte eine Physikerin diese Ausbildung, die sie Ende 2002 abschließen wird.

Ein Schüler absolvierte sein zweiwöchiges Betriebspraktikum in der DESY-Dokumentation.

Vier ausbildende Mitarbeiter/innen von Bibliothek und Dokumentation haben im Berichtsjahr die Ausbilder-Eignungsprüfung abgelegt.

Die Ausbildungsleiterin wurde im Berichtsjahr in den gemeinsamen Prüfungsausschuss des Personalamts der Freien und Hansestadt und der Handelskammer Hamburg berufen.

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Der Dialog mit der Öffentlichkeit ist eine Herausforderung, die von DESY gern und mit großem Einsatz angenommen wird. Die Abteilung "Presse- und Öffentlichkeitsarbeit" (PR) erfüllt hier die Funktion einer "Schnittstelle" und sorgt für den erforderlichen Informationsfluss, wobei sie stets mit der vollen Unterstützung aller DESY-Bereiche und -Gruppen rechnen kann. In zunehmendem Maße gewinnt hierbei die Kommunikation des TESLA-Projekts an Bedeutung und fordert verstärkten Einsatz. Ein zentrales Ereignis zu TESLA im Berichtsjahr war die Veröffentlichung des "Technical Design Reports" am 23. März im Rahmen eines zweitägigen Kolloquiums "Scientific Perspectives and Technical Realisation of TESLA", für das ein aufwendiges Presseund Informationsangebot erstellt wurde.

Neben solchen Schwerpunkt-Projekten, die den umfangreichen Einsatz aller PR-Ressourcen fordern, bedeutet PR-Arbeit, ständig ein aktuelles und vielfältiges Spektrum an Informationsangeboten und Kommunikationsmaßnahmen zu pflegen. Dazu gehören die Herausgabe von Informationsschriften für einen breiten Leser- und Interessentenkreis sowie der weit gefächerte Kontakt zu den Medien, der steigende Bedeutung im Tagesgeschäft erhält, weil zum einen das Medienangebot zunimmt (Printund Online-Medien sowie Fernsehkanäle) und zum anderen der Anteil der Wissenschaftsberichterstattung in den Medien ebenfalls ansteigt. Des Weiteren gehören die regelmäßige Durchführung von Besichtigungen zur PR-Arbeit (2001 kamen über 9000 Besucherinnen und Besucher in 394 Einzelgruppen zu DESY, davon 230 Schülergruppen und 60 Studentengruppen), ebenso die Präsentation DESYs auf Messen und Ausstellungen. Dazu gehört auch, ständig für allgemeine, von außen an DESY herangetragene Anfragen ansprechbar zu sein sowie die bei DESY arbeitenden Menschen über Neues aus den verschiedenen Bereichen des Zentrums zu informieren.

Im ersten Quartal des Berichtsjahres standen die Vorbereitungen für die Veröffentlichung des "Technical Design Reports" und das TESLA-Kolloquium im März im Vordergrund. Begleitend zu diesem Ereignis wurde eine Pressekonferenz veranstaltet (Abb. 86); zudem wurden erstmals mehrere, auf die Bedürfnisse verschiedener Medien speziell zugeschnittene Versionen der Pressemitteilung erstellt: eine Fassung für die Wissenschaftspresse, eine Boulevard-Fassung sowie eine kurze und eine lange Nachrichtenversion. Dieses Verfahren erspart den immer stärker unter Zeitdruck stehenden Redaktionen Arbeit und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit eines Beitrags. Die umfassende Pressearbeit wurde zusammen mit einer PR-Agentur durchgeführt. Die Medienauswertung belegt das große Interesse der Presse am Thema TESLA: Es gab auf regionaler Ebene 27 Zeitungsbeiträge, darunter eine mehrteilige Sonderserie in der Pinneberger Zeitung; überregional erschienen 73 Beiträge in Printmedien, und es wurden 9 Fernsehbeiträge gesendet (die Radiosender konnten nicht ausgewertet werden).

Presseseiten im Internet

Rechtzeitig zu diesem Ereignis wurden auch die DESY-Presseseiten für das Internet fertig gestellt (www.desy.de/presse), die speziell für die Anforderungen von Journalisten konzipiert und entwickelt wurden. Sie umfassen neben allgemeinen Serviceseiten insbesondere ein umfangreiches Fotoarchiv zu DESY sowie den Schwerpunktthemen HASYLAB, HERA und TESLA. Dieses Archiv bietet den Journalisten schnellen und direkten Zugriff auf Fotos und Grafiken in druckfähiger Qualität. Weiterhin beinhalten die Seiten allgemein verständlich verfasste, aktuelle Hintergrundinformationen zu DESY sowie den bereits genannten Schwerpunktthemen. Die Rubrik "Aktuelles" bietet Informationen und Fotos zu den aktuellen



Abbildung 86: Zu der Pressekonferenz, die anlässlich der Veröffentlichung des "Technical Design Reports" am 23. März in dem neuen FEL-Tunnel stattfand, kamen über 30 Journalisten, denen führende DESY-Vertreter Rede und Antwort standen.

DESY-Pressemitteilungen. Begleitend zur Veröffentlichung des "Technical Design Reports" fanden sich dort beispielsweise eine aktuelle Übersicht aller wichtigen Daten und Fakten zu TESLA, Pressefotos sowie Hintergrundinformationen. Der schnelle und unkomplizierte Zugriff auf presserelevante Informationen, den die DESY-Presseseiten bieten, hat sich in der Zusammenarbeit mit den Medien sehr bewährt.

TESLA-Wanderausstellung

Ein weiteres Schwerpunkt-Projekt war die Konzeption und Arbeit an einer TESLA-Wanderausstellung, die in allgemein verständlicher Form über das Projekt informieren soll. Die TESLA-Wanderausstellung wurde so konzipiert, dass sie dank einer modular-flexiblen Technik an die Bedürfnisse verschiedener Zielgruppen sowie an unterschiedliche Raumsituationen und Ausstellungsbedingungen angepasst werden kann. Die wichtigsten Ausstellungsmedien sind flexibel aufstellbare Postertafeln, Projektionen, Exponate, von denen ein Teil interaktiv ist, sowie "Wissensinseln", also Stehbücher und Computerterminals, die vertiefende Informationen bieten. Die Inhalte der Wanderausstellung umfassen alle Aspekte von TESLA (Beschleuniger, Planung, Bau, Forschung zur Teilchenphysik, Forschung mit dem Röntgenlaser) und sind in verschiedene Informationsniveaus ("Neugier", "Einblick", "Hintergrund", "Wissen") aufgeteilt. Je nach Zielpublikum und spezifischen Gegebenheiten können inhaltliche Schwerpunkte gesetzt und Informationsniveaus ausgewählt werden. Die erste Stufe der Wanderausstellung (komplette deutsche Version ohne Hintergrundinformationen in digitaler Form) wurde Ende des Jahres fertig gestellt.

TESLA-Unterrichtsmaterial

Der zweite Teil des TESLA-Unterrichtsmaterials, das DESY 1999 bei einem Schulbuch-Verlag in Auftrag gegeben hatte, wurde, wie geplant, im Berichtsjahr fertig gestellt und befasst sich mit dem Thema Teilchenphysik. Der erste Teil zum Thema Röntgenlaser erschien zur Ausstellung "Licht der Zukunft" im Jahr 2000. Der zweite Teil wurde rechtzeitig zu Beginn des zweiten Unterrichtshalbjahres nach den Sommerferien als Ergänzungslieferung zu dem vorhandenen Ringbuchordner bundesweit an alle 4200 Gymnasien, Gesamtschulen und Schulen mit gymnasialer Oberstufe sowie die Waldorfschulen geliefert. Das Unterrichtsmaterial enthält außer einer Serie von Overhead-Folien auch Schülerseiten mit Aufgaben und Hintergrund-Informationen für Lehrer. Der zweite Teil umfasst die Basisinformationen zur TESLA-Teilchenphysik und entsprechend zu Teil eins Unterrichtseinheiten für drei Niveaustufen, die für Physik Grund- und Leistungskurse geeignet sind (Abb. 87). Zudem haben Physiklehrerinnen und -lehrer die Möglichkeit, das Material als Broschüre in zwei Bänden gegen Erstattung der Versandkosten zu erwerben. Insgesamt gingen im Berichtsjahr 279 neue Bestellungen ein.

DESYs KworkQuark

Seit August 2001 gibt es eine neue Version von "DESYs KworkQuark – Teilchenphysik für alle!", welche die Basis für eine für das kommende Jahr geplante, umfassende inhaltliche Erweiterung ist (Abb. 88). Ziel ist es, KworkQuark als **das** deutschsprachige Internet-Portal für Teilchenphysik zu etablieren. KworkQuark ist anspruchsvolle Lernsoftware, die im Internet für alle frei verfügbar ist (http://kworkquark.desy.de) und sich an alle Interessierten richtet mit einem besonderen Augenmerk auf Schüler und Lehrer. Die Neuauflage ist von der Hamburger Multimedia-Agentur "Sand und



Abbildung 87: Der Ringbuchordner liegt seit August 2001 mit beiden Teilen des TESLA-Unterrichtsmaterials an allen 4200 Gymnasien, Gesamtschulen und Schulen mit gymnasialer Oberstufe sowie den Waldorfschulen vor.

Schiefer – büro für neues lernen" in Zusammenarbeit mit der PR-Gruppe konzipiert und produziert worden. Das neue KworkQuark ist optisch und inhaltlich erweitert, mit neuen Diensten versehen und in fünf Bereiche gegliedert:

- KworkQuarks Wissenswelt führt mit Hilfe von Texten, Illustrationen und Simulationen in die Grundlagen der Teilchenphysik ein. Hier erfährt jeder, woraus das Universum besteht und was es mit Elektronen, Quarks und Teilchenbeschleunigern auf sich hat. Ein Glossar, eine Zeitleiste und eine Auflistung der größten Teilchenphysikzentren runden das Angebot ab.
- KworkQuarks Hyperraum ist eine Link-Sammlung zur modernen Physik. Die hier aufgeführten Internet-Angebote sind kommentiert und nach Inhalt, Schwierigkeit und Sprache sortiert, so dass die



Abbildung 88: Die neue Version von "DESYs Kwork-Quark – Teilchenphysik für alle!" ist anspruchsvolle Lernsoftware, die im Internet für alle frei verfügbar ist.

Besucher in ihren persönlichen Profilen bestimmen können, welche Schwierigkeit und welche Sprachen angezeigt werden sollen.

- Im KworkQuark-Forum können unter "Fragen Sie KworkQuark!" weiterführende Fragen an das KworkQuark-Team gestellt werden. Auch sind hier Diskussionen zu Themen der modernen Physik möglich.
- KworkQuarks Nachrichtendienst hält alle Interessierten über neue Entwicklungen in der Teilchenphysik auf dem Laufenden. Dieser Newsletter kann von Interessierten kostenlos abonniert werden.
- Das Lehrerreich von KworkQuark richtet sich an Lehrer, die Teilchenphysik im Unterricht bereits behandeln oder dieses planen. Hier können Lehrer nach einer unkomplizierten Anmeldung Gedanken und Unterrichtsmaterial austauschen. Dies unterstützt DESYs Wunsch, moderner Physik zu einer größeren Präsenz im Schulunterricht zu verhelfen.

Im Jahr 2001 haben sich über 1600 Nutzer bei Kwork-Quark angemeldet, darunter fast 300 Lehrer, pro Monat gibt es rund 5000 Besuche. KworkQuark wurde vom Berliner Institut für Bildung in der Informationsgesellschaft (TU Berlin) für den Deutschen Bildungssoftwarepreis "digita 2002" nominiert. Als nächster Schritt folgt nun die inhaltliche und multimediale Erweiterung von KworkQuark.

Projekt "Web-Office"

Die Web-Angebote bei DESY sollen besser werden. Dazu soll das Projekt "Web-Office" beitragen. Es soll den zentralen DESY Web-Auftritt pflegen, zu dem auch ein aktueller Nachrichtendienst gehören soll, in enger Abstimmung mit den DESY-Gruppen neue Web-Konzepte und -dienste entwickeln und umsetzen sowie Hilfe bei der Erstellung von Webseiten anbieten. Um das genaue, "Wie" zu klären, wurde PR mit der Leitung der "Sondierungsphase Web-Office" beauftragt. Ziel war es, in enger Zusammenarbeit mit der IT-Gruppe ein Konzept auszuarbeiten, das einen Aufgabenkatalog für das Web-Office beinhaltet sowie eine Skizze für die mögliche Einbettung in DESYs Organisation liefert und die Anforderungen an die zukünftigen Mitarbeiter bestimmt. Ein Lenkungsausschuss begleitete die Sondierungsphase, die zudem von einer Medienagentur unterstützt wurde. Bis Ende 2001 konnte ein Konzept für das Web-Office erarbeitet werden, so dass das Web-Office im Jahr 2002 eingerichtet werden kann.

Besucherführungen

Für die Besucherführungen bei DESY wurde ein attraktiver Anlaufpunkt in der DORIS-Halle geschaffen: Die ehemalige Elektronik-,,Hütte" des ARGUS-Experiments wurde komplett umgestaltet zu einem attraktiven Standort, der, mit besonderem Bezug zu TESLA, über Physik, Datennahme und -auswertung bei Teilchenphysik-Experimenten mit Elektron-Positron-Kollisionen informiert. Die Ausstellungselemente in der Hütte sind Originalschränke mit Datenauslese-Elektronik von dem außer Betrieb genommenen ARGUS-Experiment, die zum Teil von den Besuchern bedient werden können und einen Eindruck von einer echten "Datenauslese-Hütte" vermitteln, großformatige attraktive Bildwände sowie eine Projektion (TESLA-Kollisionsanimation) und eine Darstellung von Elektron-Positron Kollisionen bei dem ehemaligen LEP-Experiment OPAL.

Im Dezember des Berichtsjahres fand bei DESY ein Workshop zum Thema "Strategic Science Communication for a Changed World" statt, an dem leitende PR-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeiter von fünf großen internationalen Teilchenphysikzentren teilnahmen. Ein wichtiges Ziel war es, durch die Identifikation gemeinsamer Kommunikationsziele und Möglichkeiten der Zusammenarbeit eine gemeinsame Außendarstellung der, politische Grenzen und kulturelle Schranken übergreifenden, physikalischen Grundlagenforschung zu konzipieren.

Messen und Ausstellungen

Ein Schwerpunkt bei der Präsentation auf Messen und Ausstellungen ist die Information der Zielgruppe Lehrer/Schüler. Deshalb nahm DESY 2001 nicht nur an der 92. Hauptversammlung des Deutschen Vereins zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU) in Köln teil, sondern auch an der 48. MNU-Regionaltagung in Bremerhaven. Weiterhin beteiligte sich DESY an Veranstaltungen, die sich an ein breit gefächertes Zielpublikum richteten. Mit einem großen Ausstellungsstand, dessen Hauptattraktion eine Nebelkammer in einem abgedunkelten Raum war, beteiligte sich DESY wie jedes Jahr an der Familienausstellung "Du und Deine Welt", zudem am "Fest der Region", das die Handelskammer Hamburg ausrichtete. Im Dezember präsentierten sich die 15 Helmholtz-Zentren im Rahmen der Jahrestagung der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft während der Festveranstaltung "Die Stärke konzertierter Forschung" im Museum für Kommunikation in Berlin.

Mit drei Filmen beteiligte sich DESY am ersten deutschen Festival für Physikfilme "Bilder aus der Physik" (IWF Göttingen, 9.11–11.11.2001). Alle drei Filme ("AMANDA", "TESLA – virtuell gesehen" und "TESLA-Röntgenlaser – Eine brillante Lichtquelle für die Zukunft") wurden von einer Jury aus Fachwissenschaftlern und Medienexperten unter die ersten 38 von insgesamt 150 Beiträgen gewählt, die auf dem Festival öffentlich vorgeführt wurden. Außerdem ist der Film "AMANDA" von den Festival-Zuschauern für die Vorführung der Publikumslieblinge ausgewählt worden und belegte Platz 5. Das Festival wurde von der IWF Wissen und Medien GmbH (dem ehemaligen Institut für den Wissenschaftlichen Film) in Zusammenarbeit mit der Fakultät für Physik der Universität Göttingen veranstaltet und stand unter der Schirmherrschaft der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Für das naturwissenschaftlich-technische Zentrum des Instituts für Lehrerfortbildung in der Gesamtschule Mümmelmannsberg stellte DESY insgesamt 13 "Hands-on" Exponate als Dauerleihgabe zur Verfügung. Die Exponate stehen in einem neuen Trakt, dem "Experimentierfeld", und machen Hamburger Schülerinnen und Schülern das Thema "Physik" anschaulich und begreifbar im wahrsten Wortsinn. Entworfen und gebaut wurden die Exponate größtenteils von der Phänomenta, einem Science Center in Flensburg, für die DESY-EXPO "Licht der Zukunft", wo sie von mehr als 450 Schulklassen auf ihre Tauglichkeit "getestet" wurden. Die Stiftung der Exponate ist die Fortsetzung einer langjährigen und guten Zusammenarbeit zwischen DESY und dem Institut für Lehrerfortbildung mit dem Ziel, das naturwissenschaftliche Interesse von Schülerinnen und Schülern zu fördern.

PR-Maßnahmen anderer DESY-Gruppen

Im Folgenden wird über Aktivitäten berichtet, die im Berichtsjahr von anderen DESY-Gruppen in Hamburg und Zeuthen durchgeführt wurden.

Einen außerordentlichen Schwerpunkt der PR-Aktivitäten in Zeuthen bildeten Konzeption, Planung und Vorbereitung einer großen Publikumsausstellung (inklusive Rahmenprogramm) zum Thema "TESLA – Licht der Zukunft", die Anfang 2002 im Automobil Forum Unter den Linden in Berlin präsentiert wird. In enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Hamburger DESY-Gruppen wurde ein Ausstellungsrundgang konzipiert, der die unterschiedlichen Aspekte von TESLA umfasste (Projekt, Beschleuniger, Teilchenphysik, Röntgenlaser). Als zentrale Exponate wurden von den Hamburger Fachgruppen eine Beschleunigungsstrecke aus fünf Original-TESLA-Resonatoren sowie der imposante Original-Prototyp der OPAL-Drahtkammer geliefert, die das Herzstück des ehemaligen LEP-Experiments OPAL war. Von der Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung (BESSY) wurde ein Original-Monochromator zur Verfügung gestellt. Ansonsten wurde bei den Ausstellungsmedien auf vorhandenes Material aus der DESY-EXPO ("Licht der Zukunft", 1.6.–31.10.2000) und der neuen TESLA-Wanderausstellung zurückgegriffen. Die Ausstellungsbetreuung wurde nach dem Vorbild der DESY-EXPO konzipiert.

Weiterhin organisierte DESY Zeuthen im Berichtsjahr insgesamt 13 Institutsbesichtigungen für Schulklassen, Studenten und interessierte Bürger sowie 6 Weiterbildungsveranstaltungen für Physiklehrer und beteiligte sich an einer Ausbildungsbörse für Lehrer im Landkreis Dahme-Spreewald sowie am Tag der Wirtschaft und Wissenschaft im Humboldt-Gymnasium Eichwalde.

Im September 2001 weihte physik.begreifen@desy.de einen neuen Experimentierbereich für Schulklassen zum Thema "Radioaktivität" ein, der von Hamburgs damaliger Schulsenatorin Ute Pape eröffnet wurde. Das Projekt bietet Schulklassen der 9./10. Jahrgangsstufe jetzt zwei verschiedene jeweils eintägige Praktika zu den Themen "Vakuum" und "Radioaktivität". In einem eigens eingerichteten Pavillon auf dem DESY-Gelände können Jugendliche selbst experimentieren und physikalische Zusammenhänge erarbeiten. In dem neu eingerichteten Themenbereich "Radioaktivität" stehen jetzt beispielsweise Versuche zum Nachweis radioaktiver Strahlung und zur Halbwertszeitbestimmung auf dem Programm (Abb. 89). Unterstützt wird das Projekt



Abbildung 89: Bei physik.begreifen@desy.de können Schülerinnen und Schüler jetzt auch Experimente zum Thema ,,Radioaktivität" durchführen.

von der Hamburger Schulbehörde, die für die pädagogische Betreuung sorgt und den Experimentierpavillon finanzierte. Im Berichtsjahr nutzten 92 Schülergruppen (etwa 1650 Schülerinnen und Schüler) das Experimentierangebot von physik.begreifen@desy.de.

An besonders interessierte Schülerinnen und Schüler wendet sich die 1998 gegründete Seminarreihe "Faszination Physik" – ein Treffpunkt und Diskussionsforum für junge Leute zu Themen der modernen Physik. Die Themen werden zusammen mit den Jugendlichen ausgesucht und unter Begleitung eines Physiklehrers diskutiert (www.desy.de/faszination.physik/).