

# Bereich Forschung (F)

## Inhalt

Übersicht	33
H1-Experiment	39
ZEUS-Experiment	53
HERMES-Experiment	67
HERA-B Experiment	79
Forschung an Lepton Collidern	97
Theoretische Physik	109
Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB	117
Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie EMBL Außenstation Hamburg	129
Max-Planck-Gesellschaft Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie	137
Elektronik-Entwicklung	141
Bibliothek und Dokumentation	147
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit	151



# Übersicht F-Bereich

## Experimentierbetrieb bei HERA

Im Berichtsjahr 2000 wurde HERA von Januar bis August bei 27.5 GeV Elektronen- und 920 GeV Protonenenergie betrieben. Damit ist die erste HERA-Experimentierphase „HERA-I 1992–2000“ erfolgreich abgeschlossen.

Im September 2000 wurde mit dem Umbau von HERA begonnen. Das Ziel ist, den Experimenten H1 und ZEUS eine fünffach höhere Luminosität und polarisierte Elektronen und Positronen zur Verfügung zu stellen. Mit einer maximalen Luminosität von  $2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  hat HERA-I die Sollluminosität um 30% übertroffen. Insgesamt wurde den beiden Collider-Experimenten H1 und ZEUS etwa  $165 \text{pb}^{-1}$  an  $e^+p$  und  $25 \text{pb}^{-1}$  an  $e^-p$  integrierter Luminosität zur Verfügung gestellt.

Das HERMES-Experiment hat insgesamt 3.5 Millionen Ereignisse mit polarisiertem Wasserstoff, 8.5 Millionen mit polarisiertem Deuterium, 2.3 Millionen mit polarisiertem  $^3\text{He}$  und 13.5 Millionen Ereignisse mit verschiedenen unpolarisierten Targets ( $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$ , He und Ne) aufgezeichnet.

Das HERA-B Experiment ist seit Frühjahr 2000 fertig gestellt. Es konnten alle Detektorkomponenten in Betrieb genommen und erste Daten zur hadronischen Erzeugung schwerer Quarks genommen werden.

Dank des ausgezeichneten HERA-Kontrollsystems war der effiziente gleichzeitige Betrieb aller vier HERA-Experimente möglich.

## Die Experimente H1 und ZEUS

Beide Collider-Experimente fanden ausgezeichnete Strahlbedingungen vor und nahmen zuverlässig und effizient Daten hoher Qualität.

Zu den herausragenden physikalischen Ergebnissen zählen eine erste Messung der paritätsverletzenden Protonstrukturfunktion  $xF_3$ , verschiedene präzise Messungen des Wertes und der Skalenabhängigkeit der starken Kopplungskonstante  $\alpha_s$ , die verbesserte Bestimmung der Gluonstrukturfunktion  $G(x)$  und der longitudinalen Strukturfunktion  $F_L$  des Protons sowie die Messung des Erzeugungsquerschnitts für Charm- und Beauty-Teilchen und verschiedener Vektormesonen in Photoproduktion und tiefunelastischer Streuung. Die Suche nach Effekten jenseits des Standard-Modells der Teilchenphysik hat bisher nur obere Grenzen geliefert.

Seit September werden bei HERA und den Experimenten umfangreiche Umbau- und Verbesserungsarbeiten zur Vorbereitung der HERA-Luminositätserhöhung vorgenommen. Dazu gehören der Einbau supraleitender Strahlmagnete in die Detektoren, neue Kalorimeter und Elektronik für die Luminositätsbestimmung, ovale Strahlröhren aus dünnwandigem Al-Be, der Neubau bzw. die Erweiterung von Siliziumvertexdetektoren und Verbesserungen der Spurdetektoren in der Proton-Vorwärtsrichtung.

## Das HERMES-Experiment

Durch Änderungen am polarisierten Gastarget konnte zu Beginn des Berichtsjahres die Targetdichte um etwa einen Faktor zwei erhöht werden. Seit dem Frühjahr 2000 wird außerdem für jeweils eine Stunde am Ende jeder Positronfüllung das Target mit verschiedenen unpolarisierten Gasen der hundertfachen Dichte im Vergleich zum polarisierten Deuterium gefüllt. So konnten zusätzlich 13.5 Millionen tiefunelastische Ereignisse praktisch ohne Luminositätsverluste für die anderen Experimente registriert werden.

Zu den wichtigsten physikalischen Ergebnissen der HERMES-Kollaboration im Berichtsjahr zählen die

Bestimmung der Spinstruktur  $g_1$  von Proton, Deuteron und Neutron, die Messung der verschiedenen Quarkdichten im Nukleon, die Identifizierung von Ereignissen der „Tief-Virtuellen-Compton-Streuung“ (DVCS) und die Bestimmung der Polarisierung der  $\rho$ -Mesonen in Elektroproduktion. Durch den Vergleich der Teilchenproduktion an unpolarisiertem Stickstoff und Deuterium wurde außerdem die Formationszeit geladener Teilchen in hadronischen Wechselwirkungen untersucht.

Als Vorbereitung für die Zeit nach der HERA-Luminositätssteigerung wurden kleinere Umbauarbeiten und Verbesserungen am Detektor durchgeführt sowie ein Dipolmagnet für das transversal polarisierte Target, mit dem 2001–2002 gemessen werden soll, konstruiert und in Auftrag gegeben.

### Das HERA-B Experiment

Ziel des HERA-B Experiments ist die Untersuchung seltener Zerfälle von Teilchen, die Charm- und Bottom-Quarks enthalten – speziell die Messung der CP-Symmetrie bei B-Zerfällen.

Anfang 2000 waren das HERA-B Spektrometer und das sehr aufwendige Triggersystem zu 100% fertig gestellt. Im Berichtsjahr wurden alle Komponenten in Betrieb genommen und Daten mit verschiedenen Triggerbedingungen aufgezeichnet.

Das Einlaufen des Detektors erwies sich allerdings als schwieriger als zunächst angenommen: ein Teil der Komponenten, wie zum Beispiel das Drahttarget, der Siliziumvertexdetektor, der „RICH“-Cherenkovzähler zur Teilchenidentifikation und das Datennahmesystem arbeiteten ausgezeichnet, während die Gas-Spurdetektoren, die Vortrigger und die erste Triggerstufe die Entwurfsparameter nicht erreichen konnten. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse werden nun in der HERA-Betriebspause Verbesserungen durchgeführt.

Da zu erwarten ist, dass es noch einige Zeit dauern wird, bis alle Komponenten von HERA-B wie geplant funktionieren, und inzwischen die Experimente am SLAC (USA) und bei KEK (Japan) an eigens zum Studium der CP-Verletzung gebauten Elektron-Positron-Speicherringen erfolgreich Daten nehmen, hat die Kollaboration für die Zeit 2001–2002 ein neues

Physikprogramm vorgeschlagen: die Messung der hadronischen Erzeugung schwerer Quark- und Quarkoniumzustände zur Untersuchung von Fragen der starken Wechselwirkung.

Auch wenn HERA-B bisher seine hochgesteckten Ziele nicht erreichen konnte, hat das Experiment im Jahr 2000 dennoch sehr große Fortschritte gemacht und spielt als Spektrometer mit bisher unerreichter Ereignisrate und Anforderungen an Strahlendosis eine Vorreiterrolle für die 2006 in Betrieb gehenden LHC-Experimente.

### Forschung an Lepton Collidern und Vorarbeiten für TESLA

Das Jahr 2000 stand ganz im Zeichen der Ausarbeitung des „TESLA Technical Design Report“ (TDR), der im März 2001 der Öffentlichkeit vorgestellt wird.

Die im Rahmen der II. ECFA-DESY-Studie in breiter internationaler Zusammenarbeit durchgeführten Studien konzentrierten sich auf Präzisionsmessungen zum Standard-Modell der Teilchenphysik, zum Higgs-Mechanismus und auf Untersuchungen zu Supersymmetrie und alternativen Theorien jenseits des Standard-Modells. Es wurden vor allem  $e^+e^-$ -Kollisionen im TeV-Bereich, aber auch die Optionen  $\gamma\gamma$  und  $e\gamma$  untersucht.

Für den TDR wurde ein erster Detektorentwurf ausgearbeitet: er zeigt, dass die anspruchsvollen experimentellen Anforderungen tatsächlich erreicht werden können. Die Vorversuche zur Auslese einer „Time Projection Chamber“ mit „Gas Electron Multiplier“-Folien und zum Einsatz künstlicher Diamanten als strahlendichte Detektoren bei kleinen Winkeln wurden weitergeführt.

Außerdem wurde zur Ausarbeitung der folgenden Optionen der möglichen Nutzung der Elektronen von TESLA für die Teilchenphysik beigetragen:

THERA verwendet die polarisierten Elektronen von TESLA, um sie mit den 920 GeV Protonen von HERA zur Wechselwirkung zu bringen. Damit kann unter anderem die Struktur des Protons bei höheren Partondichten als bei HERA, einem neuen Bereich der starken Wechselwirkung, untersucht werden. Außerdem ermöglicht THERA, falls eine ausreichend hohe Luminosität erreicht werden kann, eine empfindliche Suche

nach exotischen Teilchenzuständen wie Leptoquarks, Leptogluonen und angeregten Fermionen.

TESLA-N untersucht die Wechselwirkungen der longitudinal polarisierten 250–400 GeV Elektronen von TESLA mit einem polarisierten Festtarget und ELFE verwendet HERA als Stretcherring, um 15–25 GeV Elektronen von TESLA als quasi-kontinuierlichen Strahl zum Experimentieren zur Verfügung zu stellen. Ziel beider Optionen ist die Präzisionsmessung bisher nicht untersuchter Strukturfunktionen des Nukleons, welche einzigartige Tests der Theorie der starken Wechselwirkung ermöglichen.

## 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 im Rahmen der II. ECFA-DESY-Studie beteiligt.

## Experimente mit Synchrotronstrahlung

Für die Forschung mit Synchrotronstrahlung bei DESY wurden im Jahr 2000 am Speicherring DORIS 5011 Betriebsstunden dediziert und bei PETRA etwa 2200 Stunden zur parasitären Nutzung bereitgestellt. 1900 Wissenschaftler und Ingenieure kamen für eine oder mehrere Messzeiten zu HASYLAB, davon führten 460 Wissenschaftler Arbeiten zu biologischen Fragestellungen an den Instrumenten der EMBL Außenstation und der Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie der Max-Planck-Gesellschaft durch.

Die Ergebnisse sind in 700 Einzelberichten im HASYLAB Jahresbericht zusammengefasst, der über Internet zugänglich ist ([http://www-hasyllab.desy.de/science/annual\\_reports/2000\\_report/main.htm](http://www-hasyllab.desy.de/science/annual_reports/2000_report/main.htm)).

Im Berichtsjahr wurden die Arbeiten zur nichtinvasiven Abbildung von Herzkranzgefäßen erfolgreich zum Abschluss gebracht. Insgesamt wurden 379 Patienten untersucht, davon 230 im Rahmen einer gezielten Studie zur Validierung des bei DESY in Zusammenarbeit mit Medizinern vom Universitäts-Krankenhaus Hamburg Eppendorf und dem Herzzentrum Bad Bevensen, sowie mit Physikern der Universität Siegen entwickelten NIKOS Verfahrens.

Die Ergebnisse wurden von einer international zusammengesetzten Gruppe von Kardiologen analysiert. Dabei zeigte sich, dass im Vergleich mit konkurrierenden Verfahren wie dem „Magnet Resonance Imaging“ (MRI) und dem „Electron Beam Computed Tomography“ (EBCT) das am DORIS Speicherring installierte NIKOS Verfahren die bei weitem besten Bilder liefert. Diese Aufnahmen der Herzkranzgefäße werden innerhalb weniger Sekunden auf dem Bildschirm verfügbar. Weitere technische Verbesserungen des Verfahrens sind möglich.

Im Ergebnis konnten die Kardiologen den routinemäßigen Einsatz des NIKOS Verfahrens im klinischen Betrieb noch nicht empfehlen, statt dessen schlugen sie vor, die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten fortzusetzen. In dieser Zeit würde auch sichtbar, ob die hohen Erwartungen in das konkurrierende MRI Verfahren von der Industrie eingelöst werden können. DESY wird weitere F&E Arbeiten an NIKOS unterstützen, unter der Voraussetzung, dass eine Gruppe von Kardiologen die Federführung im Projekt übernimmt.

Als besonders wichtiges wissenschaftliches Ergebnis im Berichtszeitraum sei auf die Lösung der Struktur der kleinen Untereinheit des Ribosoms hingewiesen. Prof. Ada Yonath vom Weizmann Institute in Rehovot und der Max-Planck-Arbeitsgruppe Ribosomen-Struktur bei DESY erhielt für diese bahnbrechenden Arbeiten den Preis der Europäischen Kristallographischen Gesellschaft.

## TESLA Test Facility

Am 22. Februar 2000 wurde erstmals am Freielektronen Laser der TESLA Test Facility das Lasen beobachtet. Zuerst bei 108 nm, später konnte die Durchstimmbarkeit des Lasers im Bereich zwischen

80 und 180 nm gezeigt werden. Damit ist ein weiterer Beweis für die Funktionsfähigkeit des SASE Prinzips erbracht worden. Die Ergebnisse lassen sich mit den Theorien quantitativ beschreiben, und als Konsequenz werden in mehreren Ländern neue Projekte zum Bau von Freie-Elektronen Lasern nach dem SASE Prinzip verfolgt. Im Rahmen des Technical Design Reports von TESLA hat DESY ein Röntgenlaserlabor für eine breite Nutzerschaft vorgestellt.

Die Auslegung der Seeding Option für den VUV FEL, mit der die erzeugte Laserstrahlung auch auf der Zeitachse kohärent wird, wurde abgeschlossen. Die Anlage wird jetzt zusammen mit dem Institute for Storage Ring Facilities (ISA) der Universität Aarhus, Dänemark, realisiert.

### Technische Entwicklungsgruppen

Die Technischen Entwicklungsgruppen unterstützen die Experimente bei HASYLAB und an den Hochenergiebeschleunigern auf den Gebieten digitale und analoge Signalverarbeitung, Opto- und Mikroelektronik, spezielle Programmentwicklungen, Reparaturservice für Elektronik und Rechner, Wartung von Detektor-komponenten, Betrieb des Mentor-Graphik-Systems, Bestückung- und Bond-Dienstleistungen, und bei der Betreuung der Videokonferenz-Anlagen.

Außerdem werden eigenständige Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Beispiele sind ein verteiltes Transienten-Rekorder-System für Beschleuniger, Detektorsysteme zur Strahlüberwachung des Photoinjektors in Zeuthen, ein Multizellen-Silizium-Driftkammerdetektor-System für die Holographie mit Röntgenstrahlen bei HASYLAB und verschiedene Auslesesysteme für die HERA Experimente.

### Bibliothek und Dokumentation

Die Gruppe sammelt die von den DESY-Mitarbeitern benötigte Fachliteratur und verwaltet den Druck der am DESY erstellten wissenschaftlichen Veröffentlichungen (2000 waren es 194 DESY-Berichte, 6 Diplomarbeiten und 54 Dissertationen, 1 Konferenzabhandlung, 13 Interne Berichte und 136 Manuskripte in

Fachzeitschriften). Gemeinsam mit der Bibliothek des SLAC wird die gesamte Literatur der Hochenergiephysik dokumentarisch bearbeitet, in der Datenbank HEP aktualisiert und am WWW zugänglich gemacht.

Die Zentralbibliothek in Hamburg und die Bibliothek in Zeuthen informieren ihre Benutzer elektronisch über das WWW und darüber hinaus in gedruckten Bibliotheksmitteilungen über Neuanschaffungen sowie Titel und Abstracts von Publikationen in ausgewählten Zeitschriften. Außerdem wurde die Infothek der DESY-EXPO Ausstellung ausgestattet.

### Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Die Gruppe Presse und Öffentlichkeitsarbeit (PR) ist der zentrale Ansprechpartner für Informationen über die Arbeit bei DESY. Sie stellt der Öffentlichkeit ein aktuelles und vielfältiges Spektrum an Informationsangeboten zur Verfügung. Dazu gehören der direkte Kontakt zu den Medien, die Herausgabe von Informationsschriften, ein Besichtigungsprogramm und die Präsentation bei Messen und Ausstellungen.

Besonderen Wert legt DESY auch auf ein breitgefächertes Informationsangebot für Schüler und Lehrer. Beispiele sind das Projekt [physik.begreifen@desy.de](mailto:physik.begreifen@desy.de) und die mit Begeisterung von Schülern aufgenommene Seminarreihe „Faszination Physik“. Nur dank der aktiven Teilnahme aller DESY-Bereiche kann die relativ kleine PR-Gruppe dieses weit gefächerte Programm erfolgreich durchführen.

Im Berichtsjahr war ein besonderer Arbeitsschwerpunkt der PR-Gruppe die fünfmonatige zweisprachige EXPO-Ausstellung „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“, mit der DESY in der Öffentlichkeit ein großes Interesse für die Naturwissenschaften geweckt und sein augenblickliches Forschungsprogramm und sein Zukunftsprojekt TESLA vorgestellt hat. Mit 106 000 gezählten Besuchern, einem breitgefächerten und außerordentlich gut besuchten Begleitprogramm und einem intensiven Dialog zwischen Besuchern und DESY-Mitarbeitern war die EXPO ein großer Erfolg.

Zur EXPO wurde auch eine Anzahl von Broschüren in deutscher und englischer Sprache als Begleitmaterial herausgegeben. Ebenso wurde der erste Teil des TESLA-Unterrichtsmaterials, das vom DESY bei ei-

nem Schulbuchverlag in Auftrag gegeben wurde, fertig gestellt und vor Beginn der EXPO bundesweit an 4200 Gymnasien, Gesamtschulen und Schulen mit gymnasialer Oberstufe gesandt. So kamen viele der 450 Schulklassen, die die EXPO besichtigten, bereits gut vorbereitet zur Ausstellung.

Das seit 1998 installierte Internet-Angebot „Kwork-Quark – Teilchenphysik für alle“ ist ausgesprochen erfolgreich: bis Ende 2000 wurden in 30 Monaten Laufzeit 32 000 echte Besucher gezählt, und Kwork-Quark wird zunehmend auch im Unterricht an Schulen eingesetzt.

Im Rahmen des „Jahr der Physik“ war DESY zentral an der Veranstaltung „Reise zum Urknall“, die vom

3. bis 9. April 2000 in der Urania in Berlin stattfand und 15 500 Besucher anlockte, beteiligt. Für die Berliner Millennium-Ausstellung „7 Hügel – Bilder und Zeichen des 21. Jahrhunderts“ lieferte DESY Zeuthen für den Bereich „Kerne“ einige zentrale Exponate, einschließlich einer Funkenkammer zur Visualisierung der kosmischen Strahlung, die besonderes Interesse weckte.

Außerdem beteiligte sich DESY an einer Anzahl Ausstellungen wie zum Beispiel am „Global Dialog in Science and Technology“ bei der EXPO in Hannover, an der Hamburger Verbrauchermesse „Du und Deine Welt“ und an der HGF-Sonderausstellung „Abenteuer Wissenschaft“ im Deutschen Museum in München.

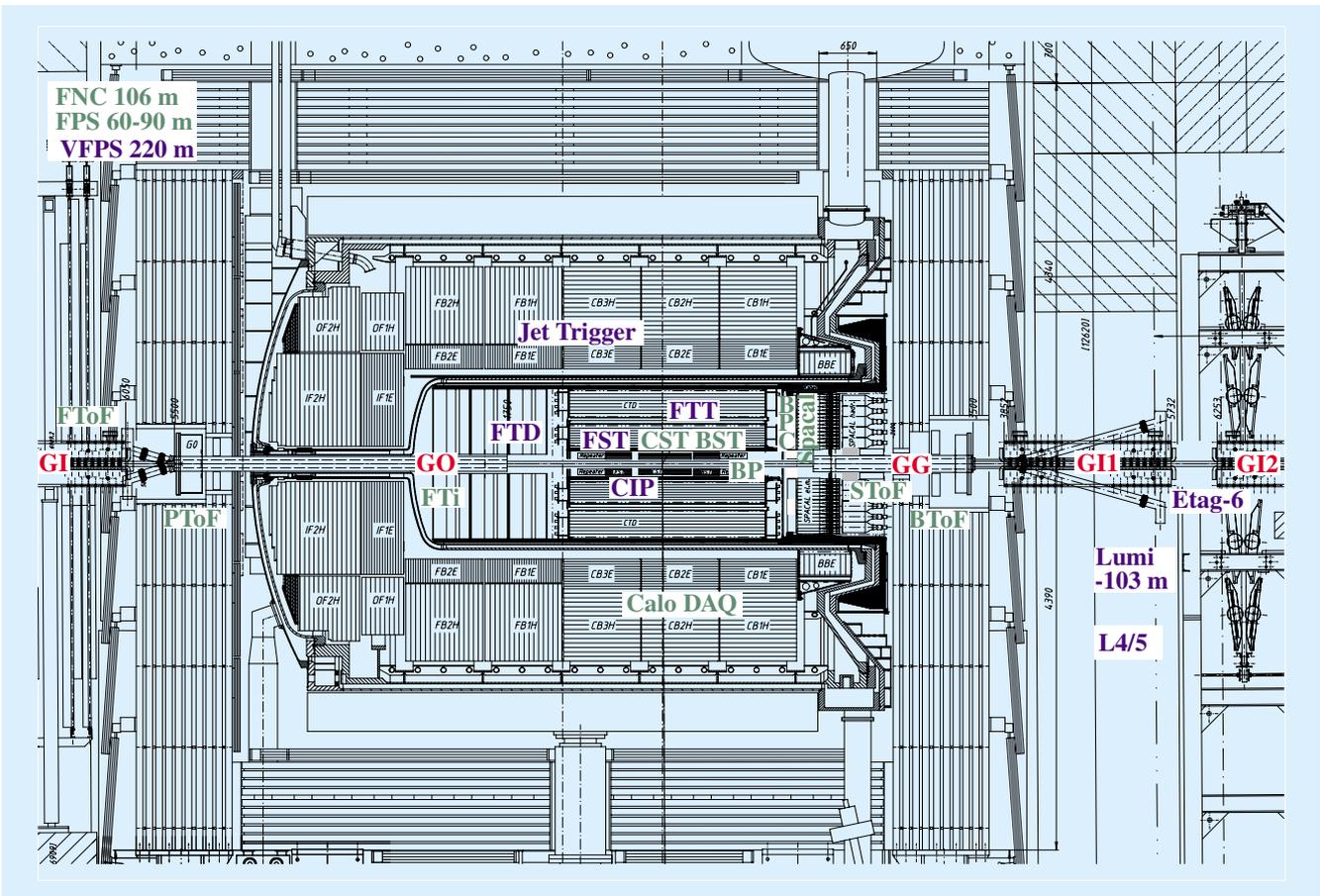


Abbildung 3: Längsschnitt durch das H1-Experiment mit den explizit gekennzeichneten Erweiterungsprojekten.

# 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, JINR Dubna, Univ. Dortmund, CEN 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. d'Aix-Marseille II, ITEP und Lebedev Inst. Moscow, MPI Phys. München, Univ. de Paris-Sud Orsay, Ec. Polytech. Palaiseau, Univ. Paris VI und VII, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

**Sprecher:** E. Elsen, DESY

Am 24. August 2000 wurde der Experimentierbetrieb mit der höchsten integrierten Luminosität beendet, die je bei HERA in einem Jahr erreicht wurde. Für das H1-Experiment bedeutete das eine nutzbare Luminosität von  $56.2 \text{ pb}^{-1}$ . Anfang September wurde der Umbau der Speicherringe und der Detektoren in Angriff genommen. Mit einer stärkeren Strahlfokussierung soll „HERA II“ ab Herbst 2001 eine drei- bis fünffach höhere Luminosität liefern.

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

In der tiefunelastischen Elektron-Proton-Streuung wurden Prozesse des neutralen ( $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$ ) und des geladenen Stromes ( $e^+ p \rightarrow \bar{\nu}_e X$  und  $e^- p \rightarrow \nu_e X$ ) untersucht. Dies führte zur Bestimmung der Quarkdichten im Proton. Mit der Proton-Strukturfunktion  $xF_3$  wurde weiterhin im H1-Experiment erstmals bei HERA die Differenz von Quark- und Antiquarkdichten, das heißt der Valenzquarkdichten, gemessen. Diese Größe enthält die Wirkung des Z-Austausches in der Interferenz mit dem Photon-Austausch.

Präzise Messungen bei kleinen quadrierten Impulsüberträgen  $Q^2$  führten zu detaillierten Tests der QuantenChromodynamik (QCD), einer genauen Bestimmung der Stärke der Kopplung  $\alpha_s$  der starken Wechselwirkung sowie der Impulsverteilung der Gluonen im Proton.

Nach Anzeichen völlig „neuer Physik“ wurde in den Daten gesucht. Die gute Übereinstimmung der Vorhersagen des Standard-Modells der Physik mit den Messungen von H1 ließ sich durch untere Grenzen für Massen exotischer Teilchen oder obere Grenzen für die Stärke neuartiger Wechselwirkungen ausdrücken.

Einen tieferen Blick „hinter die Kulissen des Confinements“ in die Welt der Partonen (Quarks und Gluonen) im Proton ermöglichte die Analyse der hadronischen Endzustände. Harte Partonen bilden sich dort als Jets, als Bündel von Hadronen, ab. Dadurch konnten Gluonen direkter als in inklusiven Messungen beobachtet und perturbative QCD-Rechnungen gezielt überprüft werden.

Selbst den Photonen, mit denen das gestreute Elektron auf die Quarks der Protonen einwirkt, lassen sich partonische Eigenschaften zuordnen. Die Partonverteilung in virtuellen Photonen, insbesondere die der Gluonen, wurde aus der Erzeugung von Jets bestimmt.

Die partonische Struktur diffraktiver Austauschprozesse bei der Streuung hochvirtueller Photonen in hadronische Endzustände wurde bei Übergängen in Vektormesonen und in Zustände mit Quark- und Gluonjets studiert. Hier gibt es jetzt interessante theoretische Ansätze im Rahmen perturbativer QCD, die mit den H1-Messungen des Jahres 2000 überprüft werden konnten.

## Datennahme und Detektor

Das Berichtsjahr war geprägt von der effizientesten Datennahme seit Beginn des Experimentierbetriebs bei HERA im Jahre 1992, wie der Anstieg der Luminositätskurve in Abbildung 4 zeigt. Im Tagesmittel wurden  $250 \text{ nb}^{-1}$  aufgenommen, gut 60% mehr als im Vorjahr.

Zur Steigerung der Luminosität trugen verschiedene Faktoren bei:

- die Spitzenluminosität des Speicherrings;
- ein verminderter Untergrund mit der Folge, dass auch die empfindlichen Spurkammern nach einer Neufüllung früh eingeschaltet werden konnten;
- verminderte störende Auswirkungen anderer Experimente auf die Strahlqualität in der H1-Wechselwirkungszone;
- als Ergebnis verbesserter Bedienungsprozeduren ein schnelleres Wiederanfahren des Detektors zur Datennahme nach Unterbrechungen.

Die Schichtbesetzung konnte von vier auf drei Personen vermindert werden. Wegen der guten Einsatzbereitschaft des Detektors sind die Daten von besonders guter Qualität.

Aufgrund des hervorragenden Betriebs konnten zum Abschluss der Messzeit bei HERA I in nur vier Tagen noch  $762 \text{ nb}^{-1}$  an Daten von einem um  $70 \text{ cm}$  strahlwärts in Proton-Flugrichtung verschobenen Wechselwirkungspunkt aufgenommen werden. Damit sind noch kleinere Elektron-Streuwinkel, das heißt noch kleinere  $Q^2$ -Werte, der Strukturfunktionsmessung zugänglich.

Mit wachsender Statistik wird für die optimale Nutzung der Daten ein genaueres Verständnis des Ansprechverhaltens der Detektoren auf Spuren und Energieeinträge erforderlich. Dieses Verständnis kann durch systematische Studien der Daten verbessert werden. Im Berichtsjahr wurden Anstrengungen zur Präzisierung des Detektorverständnisses eingeleitet mit dem Ziel, die effektive Messauflösung des Detektors zu steigern. Die ersten Resultate sind sehr vielversprechend.

Um längerfristig effizient und übersichtlich mit der wachsenden Datenmenge und den immer weiter entwickelten Analyseprogrammen umgehen zu können, wurden Voruntersuchungen zur Benutzung von objekt-

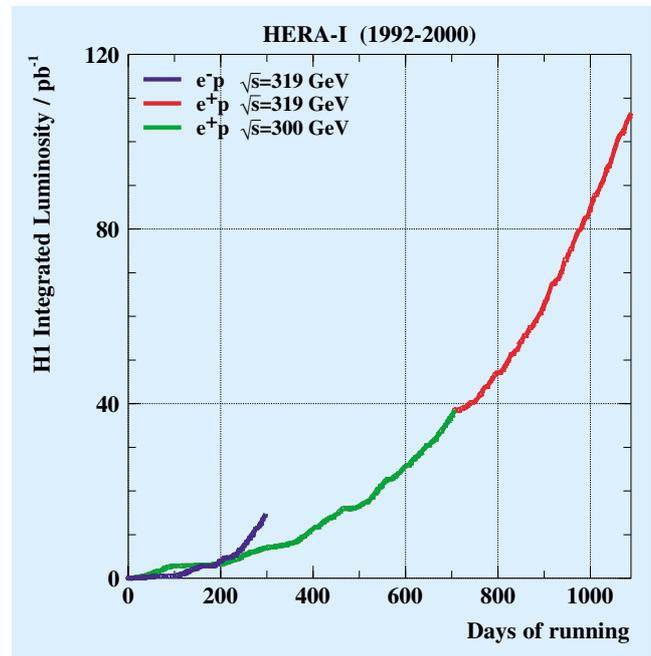


Abbildung 4: Übersicht über die seit 1993 akkumulierte Luminosität von HERA I. Dargestellt ist die vom H1-Experiment für Physikanalysen genutzte Luminosität.

orientierten (OO) Programmen und Datenstrukturen begonnen. Im September 2000 hat die H1-Kollaboration die Einführung der OO-Analysetechnik beschlossen.

## Detektorausbau für HERA II

Der Ausbau des H1-Experiments im Zuge der Luminositätserhöhung von HERA hat im September 2000 begonnen und soll bis Juni 2001 abgeschlossen werden. Neben notwendigen Anpassungen an die neue Strahlführung sollen der Teilchennachweis in Vorwärtsrichtung (Richtung des auslaufenden Protons) und die Selektivität des Triggers verbessert werden. Einen Überblick über die verschiedenen Projekte gibt Abbildung 3. Zwei strahlführende, supraleitende Magnete, GO und GG, werden innerhalb des Detektors installiert, um den Elektronenstrahl möglichst früh zu fokussieren und vom Protonenstrahl zu trennen. Nachdem bereits während des Baus der Magnetspulen und der Kryostaten am BNL (Brookhaven, USA) wertvolle Erfahrungen gewonnen werden konnten, sind eingehende Tests und Messungen bei DESY durchgeführt worden. Der erste Magnet war bereits zum Jahreswechsel einbaubereit.

Für die Halterung im Detektor ist eine aufwändige Kohlefaserstruktur konstruiert worden, die eine geregelte Verschiebung um mehrere Millimeter ermöglicht, wie sie beim Wechsel von Positronen- zu Elektronenbetrieb erforderlich ist.

Für das zentrale Strahlrohr (BP) wurde bei der Firma Brush-Wellman-Electrofusion ein 1 m langes, elliptisches Rohr aus einer 2 mm starken Beryllium-Aluminium Legierung hergestellt und vakuumdicht verschweißt. In die anschließenden Rohrteile wurden Absorber aus Wolfram mit einer optimalen Beschichtung aus Silber und Kupfer zur Absorption rückgestreuter harter Synchrotronstrahlung eingesetzt. Sie schützen die Siliziumdetektoren direkt am Strahlrohr und die zentralen Driftkammern.

Der zentrale Vertexdetektor (CST) wurde unter Wiederverwendung aller Siliziumsensoren mit einer neuen Kohlefasermechanik an die elliptische Strahlrohrgeometrie angepasst. Für die Ausleseelektronik wurde die bewährte integrierte Schaltung in einen strahlenharten CMOS Prozess übertragen, erfolgreich getestet und die Serie in Auftrag gegeben.

Für den neuen Siliziumdetektor in Vorwärtsrichtung (FST) haben umfangreiche Simulationen und Rekonstruktionsstudien ergeben, dass zwei weitere Ebenen zur Messung der radialen Spurkoordinate  $r$  neben den fünf Doppelebenen für die azimutale Koordinate  $\varphi$  bei der Mustererkennung in engen Teilchenbündeln zu einer wesentlichen Verbesserung führen. Die Mechanik und Elektronik wurden entsprechend erweitert. Der modifizierte rückwärtige Siliziumdetektor (BST) wird aus sechs Doppelebenen zur Bestimmung der  $r$ - und  $\varphi$ -Koordinaten bestehen und erlaubt damit die Messung von Richtung und Impuls des gestreuten Elektrons unter kleinen Winkeln. Weiterhin werden dort vier Ebenen mit grob segmentierten Siliziumsensoren und schneller Elektronik für die Erkennung von Elektronen in der ersten Triggerstufe installiert. Diese Komponenten wurden im DESY Teststrahl erfolgreich geprüft. Aufgrund des elliptischen und exzentrischen Strahlrohrs überdecken der rückwärtige und der vordere Siliziumdetektor nur etwa 82% des Azimutalwinkels.

Der Bau der neuen, fünfzügigen zentralen Vieldrahtproportionalalkammer (CIP) wurde erfolgreich abgeschlossen (Abb. 5). Die Signale von etwa 8500 Kathodensegmenten werden über eingelegte Mikrokoaxialkabel zu

speziell entwickelten, integrierten Vorverstärkern mit Schwellenschaltung geführt und über 160 optische Fasern mit einer Datenrate von jeweils 832 Mbit/s zur Entscheidungselektronik der ersten Triggerstufe gesendet.

Die Signale von 12 Lagen der zentralen Driftkammer (CJC) werden in dem neuen schnellen Spurtrigger (FTT) verwendet. Intensive Simulationen der großen, programmierbaren Logikbausteine für den Trigger-Algorithmus haben ergeben, dass die Digitalisierung und Pulserkennung sowie die Mustererkennung mit einer groben Bestimmung der Spurparameter bereits innerhalb von  $2.2 \mu\text{s}$  und damit auf der ersten Triggerstufe möglich ist. In der zweiten Stufe findet eine verfeinerte Mustererkennung und eine genaue Berechnung der Spurparameter statt, so dass auf der dritten Stufe die invariante Masse für frei programmierbare Spurkombinationen berechnet und so zum Beispiel Ereignisse mit Zerfällen von Charm-Mesonen ausgewählt werden können.

Für den Vorwärts-Spurdetektor (FTD) wurden fünf neue planare Driftkammern mit jeweils acht Drahtlagen gebaut. Die radialen Driftkammern, die Vorwärts-Proportionalkammern und die Übergangsstrahlungsdetektoren wurden entfernt. Die neuen Kammern ergänzen die vorhandenen neun planaren Kammern mit zwei neuen Projektionen und ermöglichen eine verbesserte Mustererkennung für die Spuren geladener Teilchen, insbesondere in Verbindung mit dem neuen vorderen Siliziumdetektor. Für den Spurtrigger in Vorwärtsrichtung werden zwei Ebenen segmentierter Szintillatoren (FTI) als Flugzeitähler eingebaut.

In Rückwärtsrichtung musste die innere Öffnung des hochauflösenden Blei-Faserkalorimeters (SPACAL) an den supraleitenden Magneten (GG) angepasst und neue bewegliche Türme für die Einbauprozedur hergestellt werden. Davor wird die neue, sechslagige rückwärtige Vieldrahtproportionalalkammer (BPC) zur Messung des Durchgangsortes von Elektronen installiert. Die Auslese der 5200 Drähte erfolgt seriell über nur sechs Kabel unter Verwendung der bewährten Verstärker- und Speicherchips, die für die Siliziumdetektoren von H1 entwickelt worden sind. Dabei musste der Abstand der Signalleitungen in drei Stufen von 2.5 mm an der Kammer auf  $50 \mu\text{m}$  am CMOS Chip reduziert werden.

Um eine höhere Selektivität für spezifische physikalische Prozesse mit lokalisierten Energiedepositionen

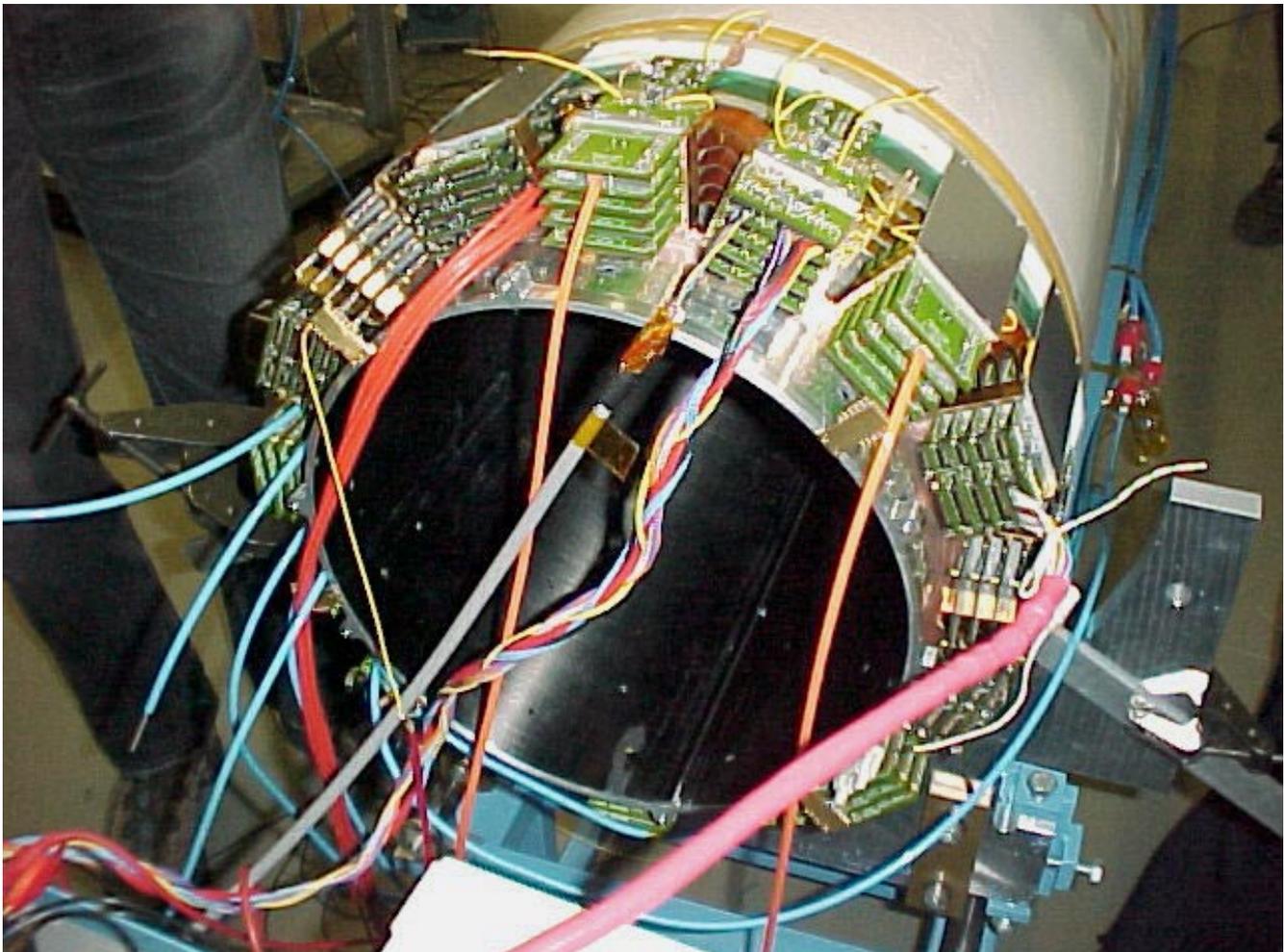


Abbildung 5: Die neue fünflagige Vieldrahtproportionalkammer (CIP) auf dem Teststand mit der montierten Ausleseelektronik und zwei Leitungen für die optische Auslese. Jedes dieser Kabel überträgt die Signale von 240 Kathodensegmenten.

(Jets) im Flüssig-Argon (LAr) Kalorimeter zu erzielen, wird der neue Jet-Trigger parallel zu dem existierenden globalen LAr-Trigger implementiert. Die verbesserte Granularität der damit zur Verfügung stehenden Information ermöglicht es, topologische Informationen bereits in der ersten Triggerstufe auszuwerten. Der Fortschritt in der elektronischen Integration gestattet hier mittlerweile ein gegenüber dem ursprünglichen Konzept mechanisch einfacheres Design.

Die Kalibration des neuen Photon-Kalorimeters für die schnelle und genaue Messung der Luminosität (Lumi) wurde in einem zweiten Testlauf am CERN weiter verbessert. Für die Absorption der Synchrotron-

strahlung ist ein Berylliumfilter vorgesehen, der die kleinstmögliche Auswirkung auf die Energie- und Ortsauflösung hat. Die schnelle Elektronik und Programmierung zur Auswertung der Zählrate und des Energiespektrums von hochenergetischen Bremsstrahlungs-Photonen wird zum ersten Strahlbetrieb von HERA zur Verfügung stehen.

Zur Messung von Neutronen in Vorwärtsrichtung wurde ein neues, segmentiertes Blei-Szintillatorkalorimeter (FNC) gebaut, welches das bisherige strahlengeschädigte Spaghetti-Kalorimeter ersetzt. Die Extrapolation der Testkalibration am CERN lässt eine Energieauflösung von 3% bei 900 GeV erwarten.

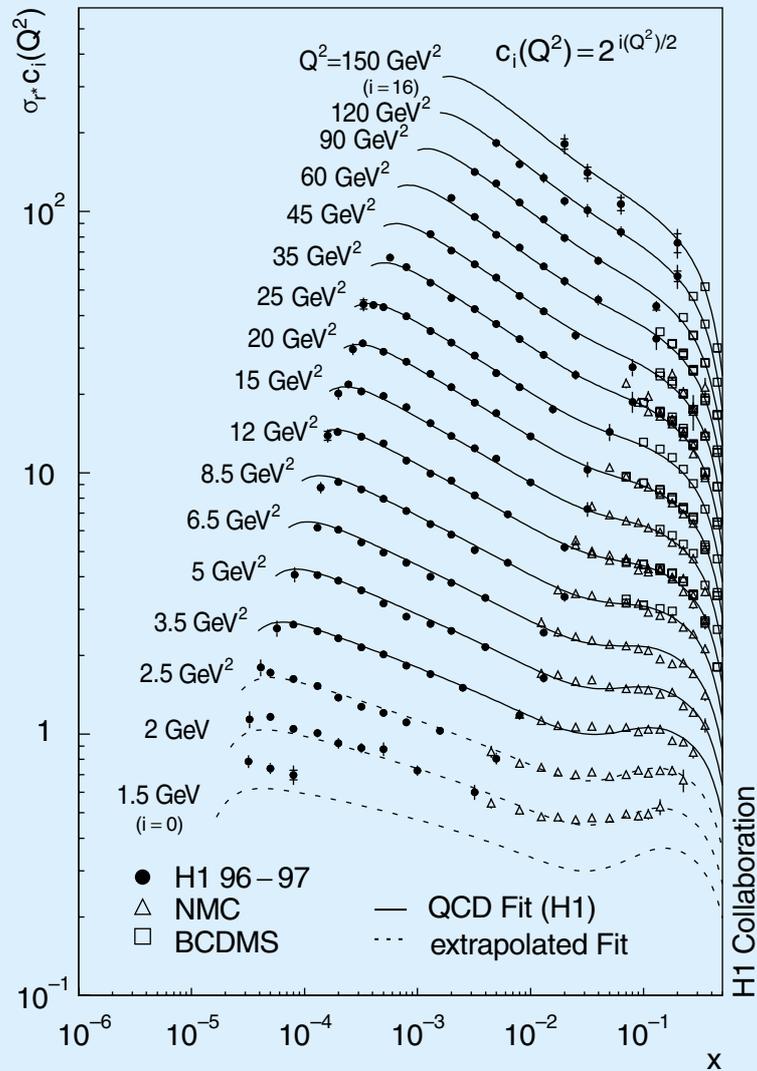


Abbildung 6: Reduzierter Wirkungsquerschnitt für den inklusiven NC-Streuprozess ( $e^+ p \rightarrow e^+ X$ ) als Funktion des Impulsanteils  $x$  des gestreuten Quarks für verschiedene Werte  $Q^2$  der Virtualität des ausgetauschten Bosons. Die H1-Daten erweitern beträchtlich den  $x$ -Bereich der Experimente mit stationärem Proton-Target (offene Symbole) und erschließen den Bereich zu kleineren  $x$ . Der Datensatz wird erfolgreich mit einer auf QCD-Rechnungen beruhenden Anpassung (durchgezogene Linie) beschrieben.

Die bestehenden vier Stationen des Vorwärts-Proton-Spektrometers (FPS) erhalten neue strahlenharte Faserdetektoren und positionsempfindliche Elektronenvervielfacher. Im Teststrahl wurde auch eine deutlich erhöhte Ansprechwahrscheinlichkeit aufgrund der geänderten Anordnung der Fasern bestätigt.

Für das Jahr 2002 ist schließlich der Einbau von zwei Stationen des neuen Vorwärts-Proton-Spektrometers (VFPS) in einer Driftstrecke zwischen zwei supraleitenden HERA-Magneten mehr als 200 m vom H1-Experiment vorgesehen. Dazu müssen die heliumgekühlten Stromleitungen umgelenkt und ein neues,

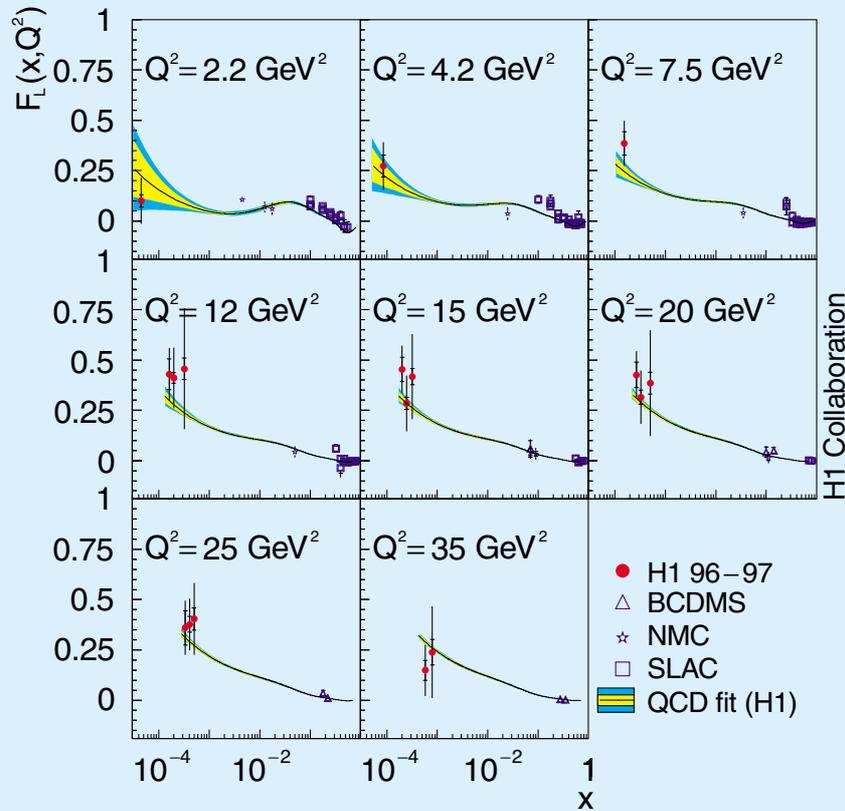


Abbildung 7: H1-Messung der von der Gluondichte abhängigen longitudinalen Strukturfunktion  $F_L$  in einem völlig neuen kinematischen Bereich gegenüber den Messungen an einem stationären Proton-Target. Der Anstieg von  $F_L$  zu kleinen Werten von  $x$  wird sehr gut im Rahmen der QCD-Anpassung (durchgezogene Linie) verstanden.

warmes Strahlrohrteil eingebaut werden. Die Konstruktion dieser Komponenten hat begonnen.

## Physikalische Ergebnisse

### Struktur des Protons und $\alpha_s$

Im Berichtsjahr wurden zwei Publikationen veröffentlicht, die aufgrund neuer Präzisionsdaten Rückschlüsse auf die Struktur des Protons und auf  $\alpha_s$ , die fundamentale Naturkonstante der starken Wechselwirkung, ermöglichen. In einer Arbeit wurde die inklusive Streuung untersucht, in der anderen die Produktion von Jets.

In tiefunelastischer  $e^+p$  Streuung bei hohen quadrierten Impulsüberträgen  $Q^2$  reagiert das Positron mit einem geladenen Konstituenten (Quark) des Protons unter Austausch eines Eichbosons der elektroschwachen Wechselwirkung. Die neutralen Eichbosonen  $\gamma$  und  $Z$  koppeln an alle Quarks und Antiquarks (NC-Prozesse), das geladene  $W^+$  jedoch nur an negativ geladene Quarks oder Antiquarks (CC-Prozesse). Die Gluonen haben keine elektroschwache Ladung und wechselwirken nicht direkt mit  $\gamma$ ,  $Z$  oder  $W^+$ .

Der totale (inklusive) Wirkungsquerschnitt für  $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$  ist proportional zur Dichteverteilung  $q(x, Q^2)$  der Quarks. In der inklusiven Streuung lassen sich aus der Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte von der Inelastizität  $y$  die beiden Strukturfunktionen  $F_2$  und  $F_L$

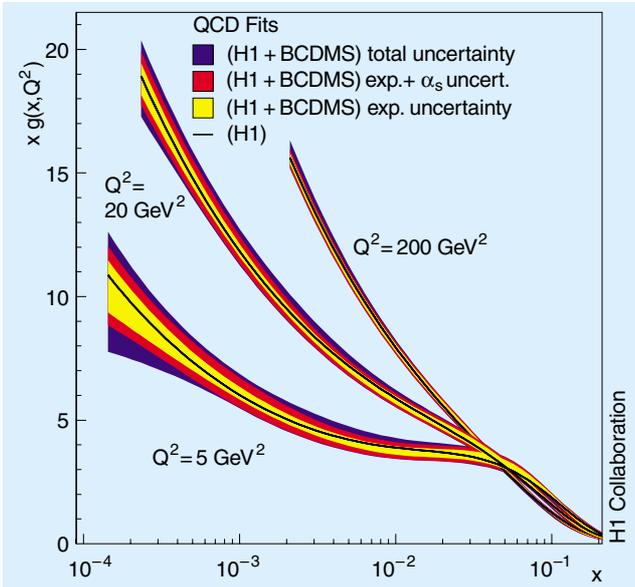


Abbildung 8: Gluonverteilung im Proton für drei verschiedene Werte von  $Q^2$  aus einer Interpretation der inklusiven Lepton-Proton Daten von H1 und BCDMS im Rahmen der perturbativen QCD. Die zentralen schwarzen Linien in den Fehlerbändern zeigen die Gluonverteilung, die aus den H1-Daten allein folgt. Die Fehlerbänder geben die Unsicherheiten des Resultats unter verschiedenen Nebenbedingungen an. Das Anwachsen der Gluondichte zu kleinem  $x$  verstärkt sich mit wachsendem  $Q^2$ .

ableiten. Sie sind mit dem so genannten reduzierten Wirkungsquerschnitt verknüpft:

$$\sigma_r = F_2(x, Q^2) - y^2 / (1 + (1 - y)^2) \times F_L(x, Q^2).$$

Die neue H1-Messung im Bereich  $Q^2 < 150 \text{ GeV}^2$  ist in Abbildung 6 gezeigt. Die Daten haben einen statistischen Fehler von typisch 1% und, dank verbesserter Instrumentierung, einen systematischen Fehler von nur 3%. Sie sind somit von einzigartiger Präzision im Bereich kleiner  $x$  und ermöglichen detaillierte Untersuchungen zum Anwendungsbereich perturbativer Methoden der QCD, zur Bestimmung von  $\alpha_s(Q^2)$  und der Struktur des Protons.

Aus der Variation von  $F_2$  mit  $x$  und  $Q^2$ , der so genannten Skalenverletzung, lassen sich die Gluondichteverteilung  $x g(x, Q^2)$  sowie die Kopplungskonstante  $\alpha_s(Q^2)$  bestimmen. Die longitudinale Strukturfunktion

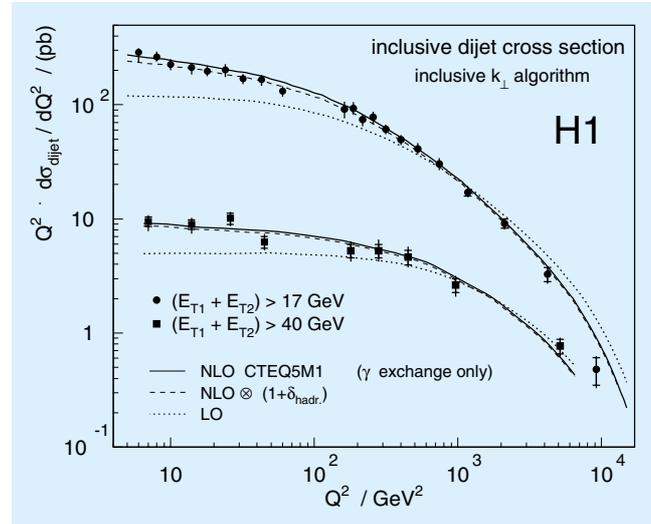


Abbildung 9: 2-Jet Wirkungsquerschnitt für den NC-Streuprozess ( $e^+ p \rightarrow e^+ X$ ) als Funktion der Photon-Virtualität  $Q^2$  für zwei untere Grenzen der Transversalenergien der Jets. Die Kurven zeigen, wie wichtig und wie erfolgreich es ist, perturbative QCD-Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO) für die Analyse zu verwenden.

$F_L$  verschwindet in einfachster Näherung für Quarks mit Spin 1/2. Durch die Abstrahlung von Gluonen können jedoch endliche Werte für  $F_L$  zustande kommen. Insofern ist eine Bestimmung von  $F_L$  (Abb. 7) ein direktes Maß für die Gluondichteverteilung  $x g(x, Q^2)$  im Proton. In einer umfassenden Analyse der neuen H1-Daten in Kombination mit früheren Messungen bei größeren  $x$  konnte unter Zuhilfenahme von perturbativen QCD-Strahlungsrechnungen die  $x$ -Abhängigkeit der Gluondichte  $x g(x, Q^2)$  (Abb. 8) und gleichzeitig zum ersten Mal  $\alpha_s$  bestimmt werden. Das Ergebnis für  $\alpha_s(M_Z^2)$  ist

$$\alpha_s(M_Z^2) = 0.1150 \pm 0.0017(\text{Expt.})_{-0.0005}^{+0.0009}(\text{Modell}),$$

mit einer zusätzlichen theoretischen Skalenunsicherheit von  $\pm 0.005$ . Die Messung von  $\alpha_s$  aus der tiefinelastischen Streuung ist damit konsistent mit dem Weltmittelwert aller anderen Messungen und von vergleichbarer Präzision. Die in Abbildung 8 gezeigte Gluonverteilung ist im theoretisch besonders interessanten Bereich kleiner  $x$  von den H1-Daten dominiert und dort bei großen  $Q^2$  experimentell auf wenige Prozent genau bestimmt. Die Daten, sowohl für

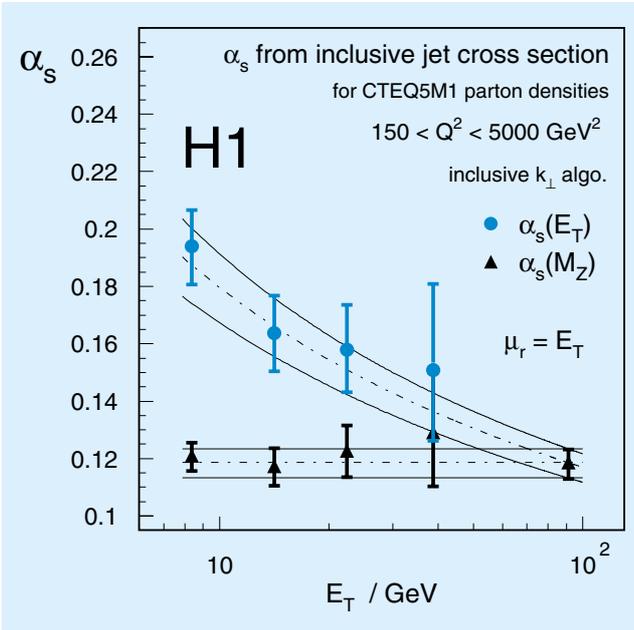


Abbildung 10: Die QCD-Kopplungsstärke  $\alpha_s$  als Funktion der Energieskala  $E_T$  (transversale Jet-Energie), bestimmt aus Wirkungsquerschnitten für Jet-Produktion. Die aus den Messungen bei verschiedenen  $E_T$  extrapolierten Werte (Dreiecksymbole) für  $\alpha_s(M_Z)$  stimmen sehr gut überein.

$F_2$  als auch für  $F_L$ , werden auch bei kleinen  $x$  gut durch die verwendete Störungsrechnung in der QCD beschrieben.

Während in den inklusiven Messungen Gluonen nur durch Prozesse höherer Ordnung beitragen, kann man in exklusiven Messungen Endzustände auswählen, die ohne Gluon-Strahlung gar nicht auftreten könnten. Das getroffene Quark wird als Jet von Hadronen aus dem Proton herausgestoßen. Ereignisse mit mehr als einem Jet werden erst möglich durch die Abstrahlung von Gluonen seitens des getroffenen Quarks, oder durch die Fluktuation eines im Proton enthaltenen Gluons in ein Quark-Paar. Gluonen machen sich im Proton in Mehr-Jet Ereignissen topologisch bemerkbar. Durch die Auswahl verliert man zwar an statistischer Signifikanz, gewinnt aber eine direktere Empfindlichkeit auf die Gluonverteilung im Proton und auf  $\alpha_s$ .

Abbildung 9 zeigt den inklusiven 2-Jet Wirkungsquerschnitt als Funktion der Photon-Virtualität  $Q^2$ . Der Ver-

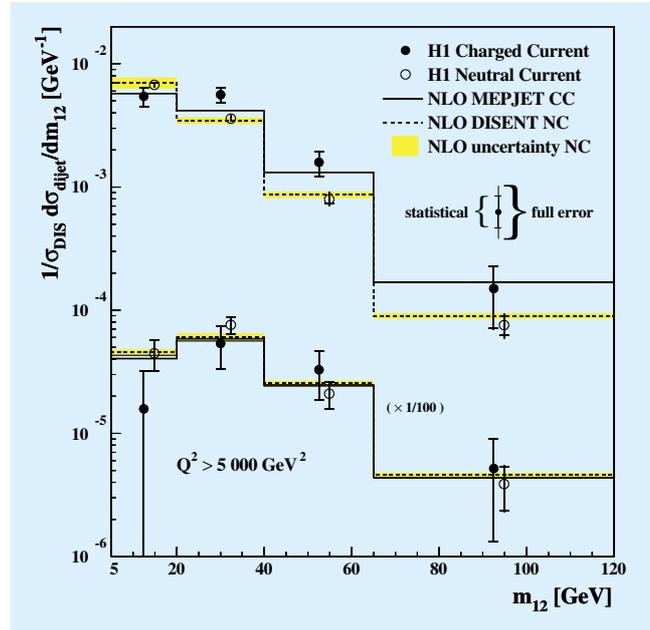


Abbildung 11: Verhältnis von 2-Jet und inklusivem Wirkungsquerschnitt als Funktion der invarianten Masse des 2-Jet Systems von CC und NC  $e^+p$  Prozessen für  $Q^2 > 640 \text{ GeV}^2$  (oben) und für  $Q^2 > 5000 \text{ GeV}^2$  (unten). Die Daten werden sehr gut durch perturbative QCD-Rechnungen in nächstführender Ordnung beschrieben.

gleich mit perturbativen QCD-Rechnungen demonstriert, dass die Daten durch Rechnungen in nächstführender Ordnung („Next-to-Leading Order“ NLO, also mit einem Parton mehr als für die Jet-Multiplizität mindestens erforderlich) sehr gut beschrieben werden. Dies ist nicht der Fall für Rechnungen in niedrigster Ordnung (LO). Die Sensitivität der Jet-Produktion auf die Kopplungsstärke  $\alpha_s$  erlaubt es, diesen fundamentalen Parameter und seine  $Q^2$ -Abhängigkeit experimentell zu bestimmen. Abbildung 10 zeigt  $\alpha_s$  als Funktion der Energieskala, hier durch die transversale Jet-Energie ausgedrückt.

In einer weiteren Analyse wurden harte CC- und NC-Prozesse, die zwei Jets aufweisen, miteinander verglichen. Es erweist sich, dass sich die Wirkungsquerschnitte im interessanten  $Q^2$ -Bereich von 640 bis 35000  $\text{GeV}^2$  nur um die verschiedenen starken Kopplungen der geladenen und der neutralen Ströme an die Quarks im Proton unterscheiden, aber offensichtlich nicht in der Wechselwirkungsdynamik. Solche

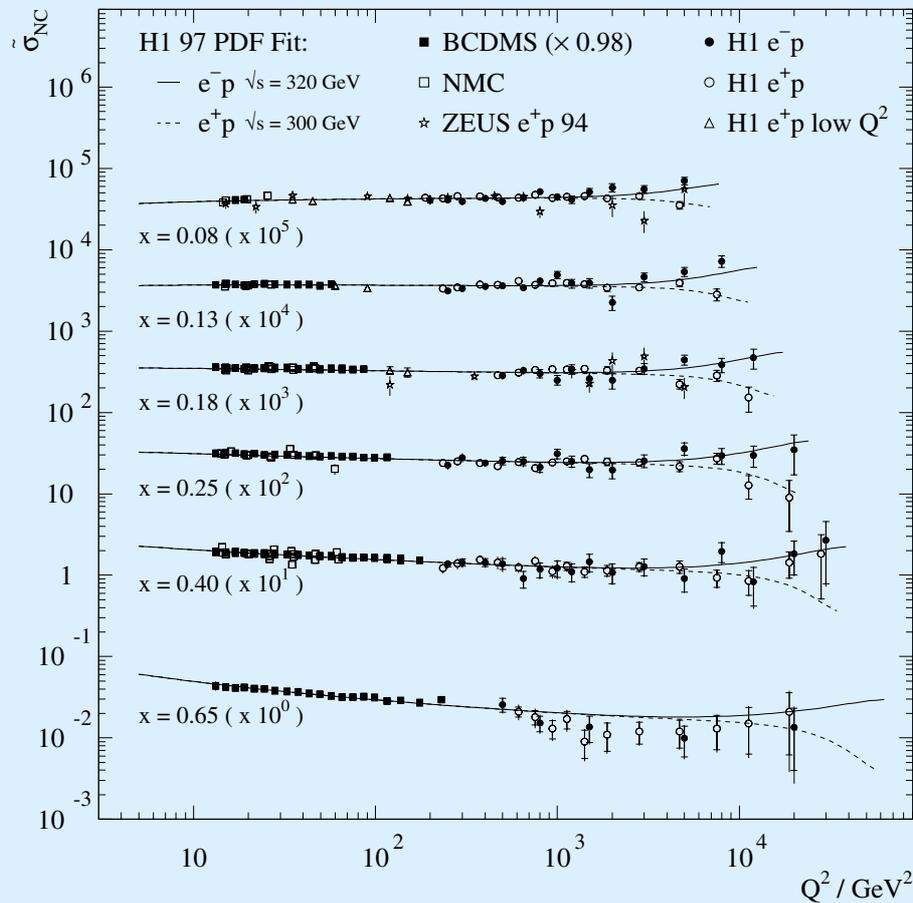


Abbildung 12: Reduzierte NC-Wirkungsquerschnitte für  $e^-p$  und  $e^+p$  Streuung als Funktion der Photon-Virtualität  $Q^2$  für verschiedene Werte der Skalenvariablen  $x$ . Die für  $e^-p$  und  $e^+p$  sichtbaren Unterschiede bei hohen  $Q^2$  resultieren aus dem Beitrag der  $\gamma Z$  Interferenz zum Streuprozess.

Studien erlauben über einen großen  $Q^2$ -Bereich eine Überprüfung der für harte Endzustände mit zwei Partonen gültigen perturbativen QCD-Rechnungen in nächstführender Ordnung. Abbildung 11 zeigt die für diese Rechnung besonders signifikante Massenverteilung der 2-Jet Systeme, einmal für den gesamten untersuchten  $Q^2$ -Bereich, und einmal für  $Q^2 > 5000 \text{ GeV}^2$ . Die NLO Rechnung wird sowohl für den Fall der geladenen wie auch der neutralen Ströme in beiden  $Q^2$ -Bereichen von den Daten bestätigt. Insbesondere lässt sich auch im Bereich des Z-Austausches bei den höchsten Impulsüberträgen und den größten 2-Jet Massen keine Abweichung von der im Standard-Modell vorhergesagten Dynamik der Jet-Produktion beobachten.

## Elektroschwache Wechselwirkung

Die neutralen Ströme beinhalten Beiträge der elektromagnetischen ( $\gamma$ ) und der schwachen (Z) Wechselwirkung. Der  $\gamma$ -Austausch dominiert für  $Q^2 < M_Z^2$ , während im Energiebereich der elektroschwachen Vereinheitlichung  $Q^2 > M_Z^2$  die Beiträge von  $\gamma$ - und Z-Austausch vergleichbar stark werden. Aufgrund der Interferenz zwischen beiden Anteilen erwartet man einen größeren Wirkungsquerschnitt für  $e^-p$  als für  $e^+p$  Streuung bei großen  $Q^2$ .

Die veröffentlichten Daten mit  $e^-$  Strahl sind in Abbildung 12 zusammen mit den bereits vorhandenen  $e^+$  Da-

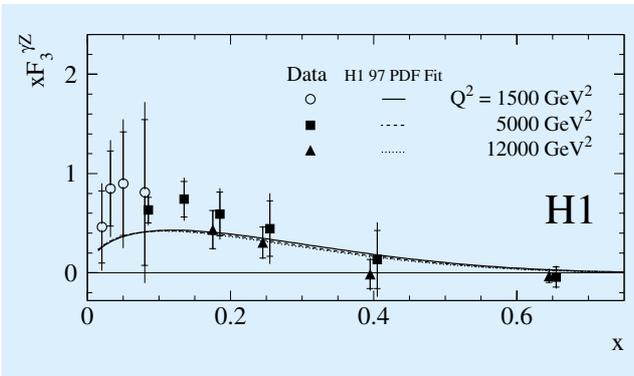


Abbildung 13: Die Strukturfunktion  $x F_3^{\gamma Z}$  als Funktion der Skalenvariablen  $x$  für große Werte von  $Q^2$ . Diese Strukturfunktion, die auf dem  $\gamma Z$ -Interferenzbeitrag beruht, misst die  $x$ -Verteilung der Valenzquarks im Proton.

ten gezeigt. Der erwartete Unterschied zwischen den Wirkungsquerschnitten ist klar sichtbar und in Form der erstmalig bei hohen  $Q^2$  veröffentlichten Strukturfunktion  $x F_3^{\gamma Z}$  (für den dominierenden  $\gamma Z$  Interferenzterm) in Abbildung 13 dargestellt.

Während die Strukturfunktion  $F_2$  ein Maß für die Summe von Quark- und Antiquarkdichten im Proton darstellt, ist  $x F_3^{\gamma Z}$  empfindlich auf deren Unterschiede, und damit auf die für die Ladungsquantenzahlen des Protons verantwortlichen Valenzquarks. Im Rahmen der bislang noch großen statistischen Fehler sind die hier gezeigten Daten mit einer Vorhersage verträglich, die auf einer Anpassung von Quarkdichten an  $e^+p$  Daten von H1 sowie an Daten anderer Experimente bei sehr viel kleineren  $Q^2$  beruht. Diese erste  $x F_3^{\gamma Z}$  Bestimmung demonstriert daher den Beitrag des  $Z$ -Austausches und bestätigt die in der QCD-Interpretation der Daten erhaltene Aufteilung der Quarkdichten in die einzelnen Quarkspezies.

### Parton-Struktur des Photons

Photonen können in Formationen von Quarks und Gluonen fluktuieren. Die Parton-Struktur quasi-reeller Photonen, also von Photonen mit  $Q^2 \sim 0 \text{ GeV}^2$ , wurde hier mit folgender Methode beobachtet: Wenn ein Photon vor der Kollision mit dem Proton in einen Schwarm

von Partonen fluktuiert, so kann es zur Streuung eines Partons vom Photon an einem Parton des Protons kommen. Das Photon wird dann nicht als Ganzes absorbiert, sondern aufgelöst in ein Parton für die Kollision und in einen Rest, der in Richtung des Photons weiterfliegt. Aus der Kinematik der Jets, die bei der Kollision entstehen, kann man die Impulse der kollidierenden Partonen ermitteln, ausgedrückt als Bruchteile  $x_\gamma$  und  $x_p$  der Impulse des kollidierenden Photons und Protons. In der Analyse muss man jedoch berücksichtigen, dass es zwischen den beiden Resten zu weiteren Wechselwirkungen und, damit verbunden, zur Emission weiterer transversaler Energie kommen kann, die sich mit der der Jets überlagert. Es ist aber in der Analyse gelungen, diesen Einfluss aus den Daten selber abzuschätzen und so die Impulsverteilung der Partonen des Photons aus dem gemessenen differentiellen 2-Jet Wirkungsquerschnitt zu ermitteln. Da die  $x$ -Verteilung der Quarkdichte in Photonen schon aus der tiefunelastischen  $e\gamma$  Streuung bekannt ist, konnte man deren Beitrag subtrahieren. Es bleibt ein Überschuss, der in Abbildung 14 zu sehen ist, und den man als Dichte der Gluonen interpretieren kann.

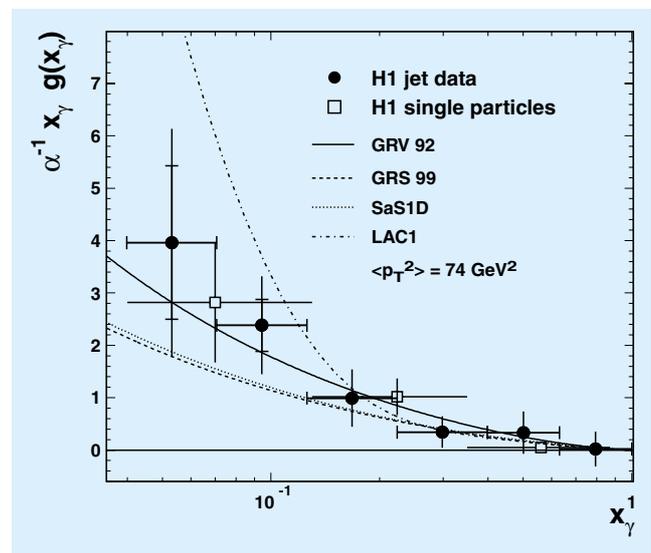


Abbildung 14: Impulsverteilung der Gluonen im Photon im Vergleich mit Vorhersagen aus verschiedenen perturbativen QCD-Rechnungen. Die Gluondichte im Photon steigt zu kleinen Werten von  $x$  stark an, eine Beobachtung, die auch für die Gluondichte im Proton gemacht wurde.

Es zeigt sich hier zum ersten Mal signifikant, dass die Dichte der Gluonen im Photon zu kleinen Werten von  $x_\gamma$  hin ansteigt, qualitativ ähnlich wie bei den Quarks und den Gluonen im Proton, während die aus der  $e\gamma$  Streuung bekannte Quarkdichteverteilung im Photon dieses Verhalten in diesem  $x$  Bereich nicht zeigt. Dies lässt sich damit erklären, dass Quarks direkt an das Photon koppeln, während die Gluonen im Photon erst als Abstrahlungen von Quarks zustande kommen. Die H1-Daten erlauben es, zwischen den aufgrund unterschiedlicher physikalischer Ansätze weit voneinander abweichenden Annahmen über die Gluon-Struktur des Photons zu unterscheiden.

## Diffraktion virtueller Photonen

Wie schon erwähnt, können Photonen in partonische Zustände fluktuieren, zum Beispiel in eine Quark-Antiquark oder eine Quark-Antiquark-Gluon Formation, oder in ein richtiges Hadron wie ein Vektormeson. In Diffraktionsprozessen, bei denen das Proton intakt bleibt oder nur leicht angeregt wird und somit kein Farbaustausch zwischen Proton und Photon-Fluktuation stattfindet, können diese Zustände als auslaufende hadronische Vielteilchensysteme beobachtet werden. Der diffraktive Übergang des virtuellen Photons in einen reellen Zustand gibt deshalb einen Einblick, in welche Parton-Formationen das Photon fluktuiert. Außerdem erlauben Prozesse der „harten“ Diffraktion mit hoher Photon-Virtualität  $Q^2$  oder mit Jets eine partonische Interpretation des farblosen Austausches im Rahmen der perturbativen QCD.

Deshalb wurden in einer Arbeit diffraktive Ereignisse analysiert, bei denen ein hochvirtuelles Photon in einen relativ massiven Vielteilchen-Endzustand transformiert wird. Ein Teil dieser diffraktiven tiefunelastischen Ereignisse weist zwei oder drei Jets mit jeweils großem Transversalimpuls auf.

In einem Modell wird die Diffraktion in tiefunelastischer  $e p$  Streuung behandelt als Streuung an einem diffraktiven Austauschteilchen, dem Pomeron, welches vom Proton emittiert wird. Dadurch wird der Diffraktionsprozess von der Parton-Struktur des Protons entkoppelt und über die Partondichte dieses hypothetischen Austauschteilchens beschrieben. Aus früheren

Messungen der inklusiven tiefunelastischen Diffraktion bei HERA gibt es bereits Ergebnisse für die Gluondichteverteilungen in diesem hypothetischen Austauschteilchen (Abb. 15a) und zugleich das Resultat, dass es nicht mit dem Pomeron aus der Hadron-Hadron Streuung bei kleinen Impulsüberträgen identifiziert werden kann. Der die Energieabhängigkeit kontrollierende Parameter  $\alpha_P(0)$  ist mit 1.17 größer als 1.08, dem Wert aus der weichen Hadron-Hadron Diffraktion. In Bezug auf die Parton-Struktur ergaben Messung und QCD-Analyse der Strukturfunktion des diffraktiven Austausches  $F_2^{D(3)}$  eine eindeutige Dominanz von Gluonen über Quarks. Doch diese aus inklusiven Messungen gewon-

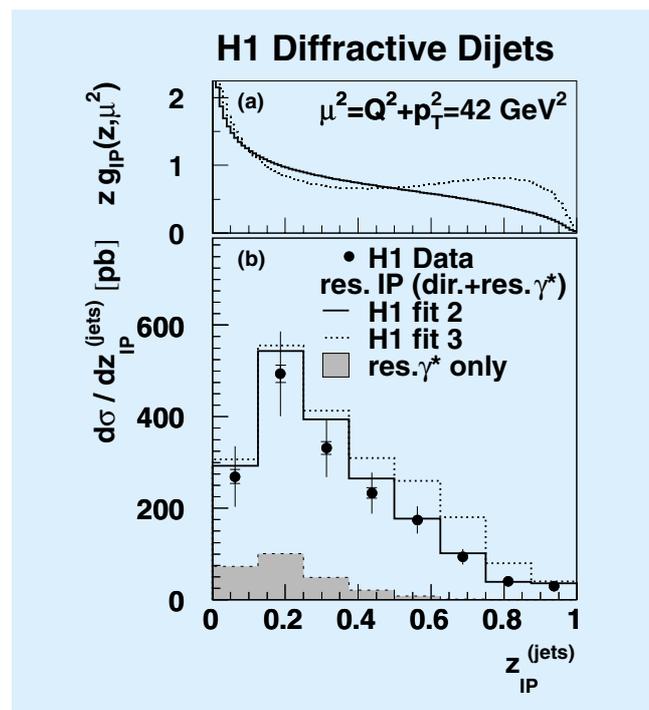


Abbildung 15: (a) Gluonverteilung im Pomeron als Funktion des Impulsanteils  $z$  im Pomeron. Die beiden Linien entsprechen zwei möglichen Anpassungen (fit 2,3) an H1-Daten der inklusiven diffraktiven Streuung in LO QCD. (b) Wirkungsquerschnitt für diffraktive Jet-Produktion als Funktion von  $z$  im Vergleich zu zwei Vorhersagen, die auf den oben gezeigten Gluonverteilungen beruhen. Die Jet-Daten sind direkt sensitiv auf diese Gluonverteilungen und liefern eine unabhängige Bestätigung der aus den inklusiven Daten gewonnen partonischen Interpretation der Diffraktion.

nenen indirekten Ergebnisse zur Impulsverteilung der Gluonen hatten große Unsicherheiten. Abbildung 15b zeigt den Wirkungsquerschnitt als Funktion des Impulsanteils des Partons aus dem Pomeron, wie er aus der Kinematik von Jets rekonstruiert werden konnte, zusammen mit Vorhersagen für die beiden in Abbildung 15a gezeigten Lösungen für die Gluondichte aus der erwähnten inklusiven Analyse. Nur für eine dieser Dichteverteilungen gibt es eine gute Übereinstimmung mit den Daten. Die hier aus den Jets gewonnenen Informationen erlauben eine wesentlich direktere Bestimmung der Gluonverteilung des diffraktiven Austausches als inklusive Messungen.

Theoretisch anspruchsvoll ist die Berechnung der Diffraktion als 2-Gluon-Austausch zwischen den Partonen des Protons und einer Quark-Antiquark bzw. Quark-Antiquark-Gluon Fluktuation des Photons. Hier erweist sich, dass in dem kinematischen Bereich, für den perturbative Rechnungen möglich sind, die Messungen tatsächlich beschrieben werden können. Es gibt auch Ansätze, die diffraktive Streuung mithilfe einer phänomenologischen Farbneutralisierung durch weitere sehr weiche Gluonen („Soft Colour Interaction“ SCI) zu erklären. Versucht man jedoch, die im Rahmen solcher Modelle durch Anpassung an diffraktive und totale inklusive Messungen gewonnenen Parametrisierungen auf die Jet-Daten anzuwenden, so erhält man keine befriedigende Beschreibung.

Der Vergleich von Resultaten aus der inklusiven diffraktiven Streuung mit den hier gezeigten Jet-Daten führt damit zu einer direkten experimentellen Bestätigung eines von Gluonen dominierten diffraktiven Austausches und ermöglicht Einblicke in die Dynamik der zugrunde liegenden, gleichzeitigen Wechselwirkung zwischen mehreren Partonen aus Photon und Proton.

## Erzeugung schwerer Vektormesonen

Im Berichtsjahr wurden zwei Publikationen veröffentlicht, die sich auf die diffraktive Erzeugung schwerer Vektormesonen beziehen.

Zum einen wurden Resultate über die Elektroproduktion von  $\phi$ -Mesonen gewonnen. Sie fügen sich konsistent ein in bereits vorliegende Ergebnisse zu anderen Vektormesonen  $V$ . Abbildung 16 zeigt den totalen elastischen Wirkungsquerschnitt  $\gamma^*p \rightarrow Vp$ . Es gibt

offensichtlich eine universelle Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts von der Größe  $(Q^2 + M_V^2)$  für alle Massen  $M_V$  der Vektormesonen und unterschiedliche Photon-Virtualität  $Q^2$ .

Zum anderen konnten die beiden nächst schwereren Vektormesonen  $J/\psi$  und  $\Upsilon$ , gebundene Zustände aus charm-anticharm- bzw. bottom-antibottom-Quarks, in der elastischen Photoproduktion gemessen werden. Die totalen Wirkungsquerschnitte sind ebenfalls in Abbildung 16 gezeigt. Der  $\Upsilon$  Wirkungsquerschnitt liegt oberhalb der empirischen Kurve der  $(Q^2 + M_V^2)$ -Abhängigkeit.

Ein interessantes Ergebnis lieferten die Abhängigkeiten des  $J/\psi$  Wirkungsquerschnitts vom Quadrat des Impulsübertrags  $t$  auf das Proton und von

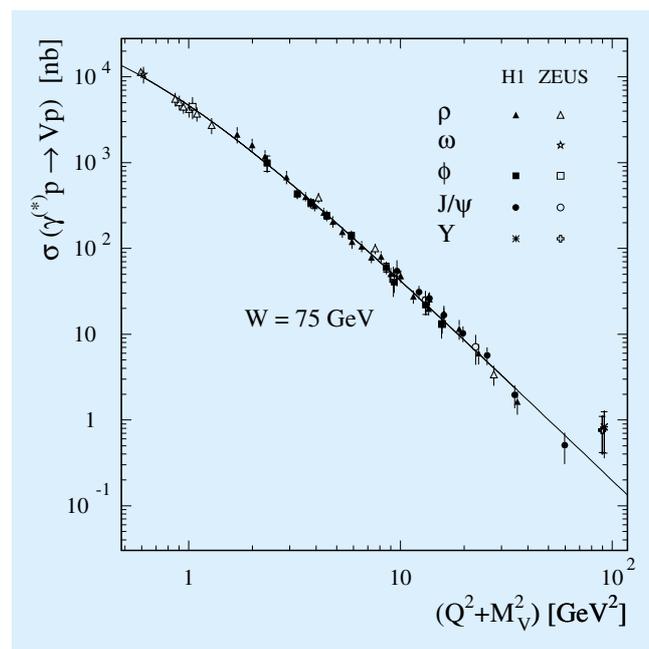


Abbildung 16: H1- und ZEUS-Messungen des totalen elastischen Wirkungsquerschnitts  $\gamma^*p \rightarrow Vp$  für die Produktion von Vektormesonen ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $J/\psi$  und  $\Upsilon$ ) als Funktion der Variablen  $(Q^2 + M_V^2)$ . Die Daten sind auf eine Schwerpunktsenergie  $W = 75$  GeV umgerechnet, mit den bekannten Energieabhängigkeiten. Unterschiede, die aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Ladungen der Quarks erwartet werden, sind bereits berücksichtigt. Die Kurve ist eine Anpassung der Form  $(A + Q^2 + M_V^2)^n$ .

der  $\gamma p$  Kollisionsenergie  $W$ . Aus dem Wert  $b = 4.73 \pm 0.25 \pm 0.39 \text{ GeV}^{-2}$  für den Steigungsparameter der  $t$ -Verteilung kann man schließen, dass das Vektor-meson  $J/\psi$  deutlich kleiner ist als ein normales Hadron wie zum Beispiel das Proton oder das  $\rho$ -Meson. Die in der H1-Analyse beobachteten Werte stimmen mit einer Vorhersage einer perturbativen 2-Gluon-Austausch Rechnung für den harten Diffraktionsprozess überein. Diese Übereinstimmung ist eine wichtige Bestätigung dieses Ansatzes für ein mikroskopisches Verständnis der Diffraktion.

## Abweichungen vom Standard-Modell

Auch wenn das Standard-Modell in der Beschreibung von Daten seit vielen Jahren sehr erfolgreich ist, ist es unbefriedigend, dass es viele unabhängige Parameter enthält, die empirisch bestimmt werden müssen. Man darf also vermuten, dass durch tieferes physikalisches Verständnis Zusammenhänge zwischen diesen Parametern hergestellt werden können. Deshalb wurden die Daten mit den höchsten Werten des Impulsübertrages eingehend untersucht, um aus möglichen Abweichungen vom Standard-Modell Hinweise auf solche Strukturen zu erhalten.

Das H1-Experiment hat die  $e^+p \rightarrow e^+X$  Daten im  $Q^2$  Bereich von 200 bis 30 000  $\text{GeV}^2$  mit den Vorhersagen des Standard-Modells verglichen. Der höchste

Wert von  $Q^2$  entspricht einer Ortsauflösung von 1/1000 des Protonenradius. Es wurden keine Hinweise auf räumliche Strukturen in den Quarks gefunden. Daraus kann man schließen, dass die leichten Quarks kleiner als  $1.7 \times 10^{-18} \text{ m}$  sind, und dass mögliche neue Kräfte entsprechend kurze Reichweite haben. Für deren Austauschteilchen bedeutet das, dass sie schwerer als 2–5 TeV sind, also mindestens etwa 20–50 mal so schwer wie die Austauschteilchen  $Z$  und  $W^\pm$  der schwachen Wechselwirkung.

Eine interessante Hypothese bezieht sich auf das Graviton. Während Quarks und Gluonen die gewohnten vier Dimensionen einnehmen, könnte ein masseloses Graviton in einem  $4 + n$ -dimensionalen Raum existieren, wobei der Raum in diesen zusätzlichen Dimensionen auf ein sehr kleines Volumen zusammengezogen („kompaktifiziert“) ist. Das Volumen dieses Raums ist durch eine Massenskala  $M_S$  charakterisiert. Wenn die Zahl dieser zusätzlichen kompaktifizierten Dimensionen größer als zwei ist, könnten Auswirkungen der Gravitationswechselwirkungen zwischen Elektron und Quarks und auch Gluonen bei HERA sichtbar werden. Der erwartete Einfluss eines solchen Gravitons sollte sich im differentiellen Wirkungsquerschnitt bei den größten Werten von  $Q^2$  bemerkbar machen. Aus der guten Übereinstimmung der Daten mit dem Standard-Modell ergeben sich Grenzen (95% CL) für die Massenskala  $M_S$  von mindestens 0.48 oder 0.76 TeV, je nach Vorzeichen der Interferenz des Gravitons mit dem neutralen Strom.

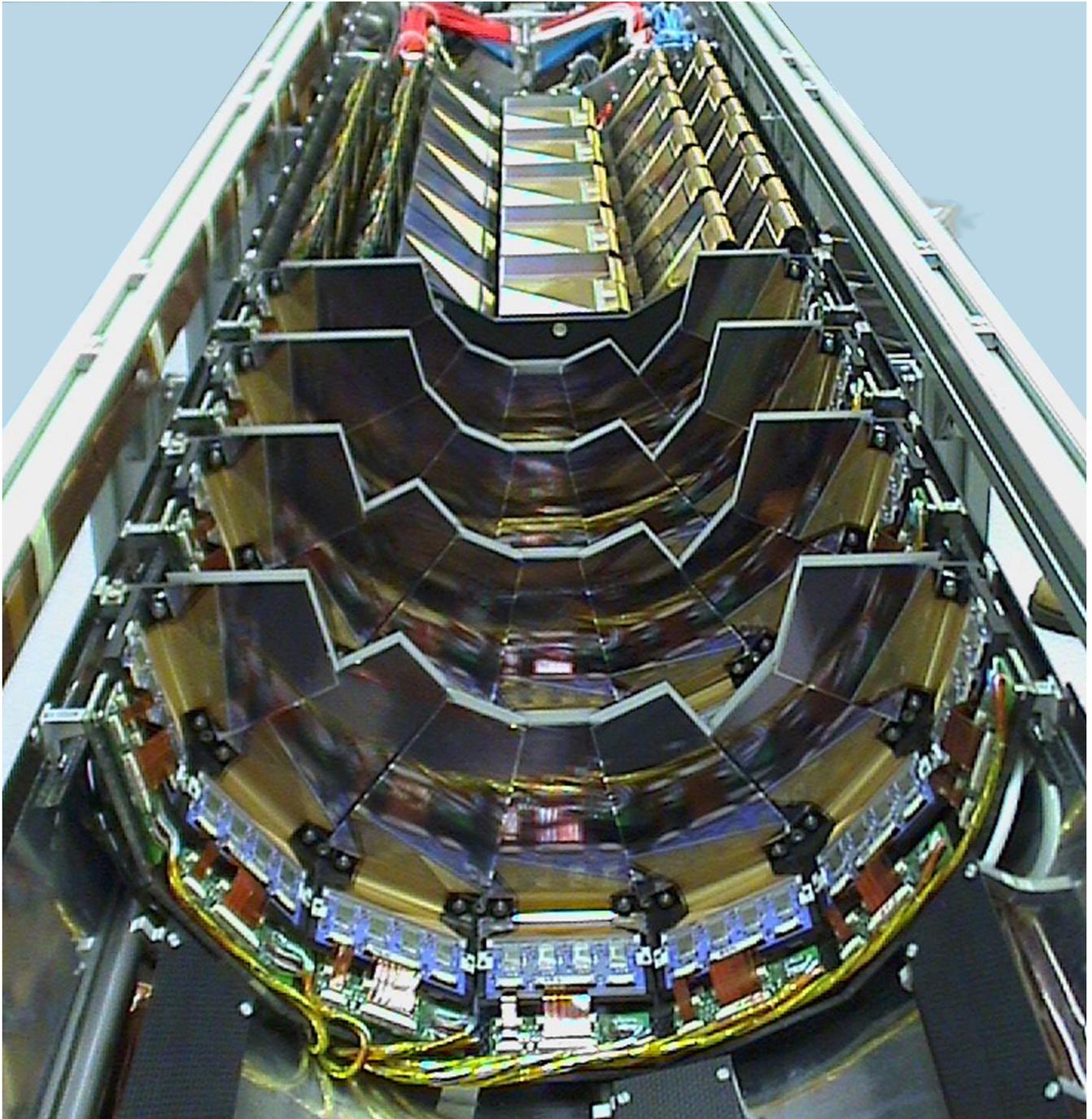


Abbildung 17: Eine Hälfte des ZEUS-Mikro-Vertex-Detektors. Im Vordergrund sind vier Lagen von Vorwärtsmodulen mit Frontend-Hybriden, im Hintergrund die Barrelmodule.

# ZEUS-Experiment

**Beteiligte Institute:** Univ. und INFN Torino Alessandria, 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, INFN Frascati, Univ. Freiburg, Univ. Glasgow, DESY und Univ. Hamburg, Univ. of Iowa Iowa City, 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. Seoul, Univ.-GH Siegen, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. Toronto, Inst. of Part. and Nucl. Stud. 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

Die Datennahme der HERA-Detektoren begann im Jahr 2000 nach einer etwas verlängerten Weihnachtunterbrechung am 18. Januar und endete am 24. August, dem Beginn der Umbauphase für die HERA-Luminositätssteigerung. Der HERA-Betrieb begann mit 920 GeV Protonen und 27.5 GeV Positronen. Nach einem sehr erfolgreichen Start von HERA und ZEUS und der sich abzeichnenden Möglichkeit, eine Rekordluminosität mit Positronen zu liefern, wurde im April von HERA und den Experimenten beschlossen, entgegen den ursprünglichen Plänen bis zum Ende der Datennahmeperiode in 2000 den Betrieb mit Positronen fortzusetzen und nicht auf Elektronen umzuschalten. HERA lief das ganze Jahr sehr konstant und mit hoher Luminosität. So wurde diese Datennahmeperiode mit einer zur Physik-Analyse nutzbaren, integrierten Luminosität von  $48 \text{ pb}^{-1}$  zum bisher erfolgreichsten Jahr für ZEUS. Insgesamt hat ZEUS jetzt vor dem Umbau zur Luminositätssteigerung integrierte Luminositäten von  $116 \text{ pb}^{-1}$  für Positronen und  $17.5 \text{ pb}^{-1}$  für Elektronen zur Physik-Analyse zur Verfügung.

Darüber hinaus wurde im Berichtszeitraum weiter intensiv am Bau der neuen Detektorkomponenten

gearbeitet, dem Mikro-Vertex-Detektor (MVD) (Abb. 17), dem „Straw Tube Tracker“ (STT) und einem neuen Luminositäts-Monitoringsystem, die alle während des Umbaus zur HERA-Luminositätssteigerung eingebaut werden.

Die ZEUS-Kollaboration hat in diesem Jahr neun Veröffentlichungen verfasst. Einige der Physik-Resultate werden kurz vorgestellt.

## Datennahme

Das dreistufige ZEUS Triggersystem hatte keine Probleme mit der hohen Luminosität. Bei HERA-Designluminosität von  $1.6 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  betrug die Totzeit etwa 2% bei Datenraten von typischerweise 300 Hz in der ersten Stufe und 15 Hz am Ausgang der dritten Stufe.

Das zentrale Datenerfassungs- und Überwachungssystem wurde weiter modernisiert und im Hinblick auf Stabilität und Wartbarkeit verbessert. Hierzu gehörte der Einsatz von objekt-orientierten Methoden und modernen Programmiersprachen bei der Weiterentwicklung bestehender Systeme. Die vermehrte Nutzung von

WWW-Browsern oder WAP-Handies erleichtert die Beobachtung des Experimentbetriebs und die Fehlerdiagnose von den beteiligten Instituten aus. Durch die verbesserten Überwachungsmöglichkeiten konnte die Schichtbesetzung von drei auf zwei Personen reduziert werden.

Für das ZEUS Protonenspektrometer (LPS) war die vergangene Datennahmepériode die letzte, da sein Platz nach dem HERA-Umbau von Strahlführungsmagneten eingenommen wird. Es wurde deshalb besondere Mühe darauf verwendet, den Untergrund von HERA so zu optimieren, dass die empfindlichen Spektrometertektoren möglichst häufig an den Strahl gefahren werden konnten. Dadurch ist es gelungen, bei über 70% der von ZEUS aufgezeichneten Luminosität das Spektrometer zu betreiben.

Einige Zeit nach Beginn der Datennahme häuften sich Hochspannungsabschaltungen in der zentralen Driftkammer (CTD) wegen zu hoher Ströme in den äußeren Lagen, die nicht durch Untergrund vom Strahl hervorgerufen wurden. Daraufhin wurde im Juni die Gasmischung leicht geändert und etwas Wasserdampf hinzugefügt. Seither arbeitete die CTD störungsfrei.

Im Offline-Bereich wurde trotz der Rekordluminosität HERAs eine zeitnahe Rekonstruktion der gerade aufgezeichneten Daten erreicht, wobei bis zu 450 000 Ereignisse pro Tag prozessiert wurden. Zur Analyse der Daten wurde das bestehende ZARAH-System durch eine PC-Farm ergänzt, womit man eine Verdopplung der verfügbaren Rechenkapazität erreichte. Die Plattenkapazität zur Speicherung der Ereignisdaten wurde von 3 auf 6 TB erweitert. Für das ZEUS Computing der Jahre 2001–2005 wurden Konzepte und Planungsmodelle entwickelt, die den Herausforderungen durch die HERA-Luminositätserhöhung und die neuen ZEUS-Detektorkomponenten Rechnung tragen.

## ZEUS Umbau

Die Luminositätserhöhung von HERA erfordert den Einbau neuer Quadrupolbrücken und supraleitender Magnete (GO und GG) innerhalb des ZEUS-Detektors. Um Platz zu schaffen, wurden das rückwärtige Strahlrohrkalorimeter (BPC) sowie das Vorwärts-Plug-Kalorimeter (FPC) endgültig entfernt. Die neuen

Quadrupolbrücken wurden im Dezember eingebaut. Das Aufstellungssystem der Magnete auf den Quadrupolbrücken wurde entwickelt und installiert. Die dem Wechselwirkungspunkt zugewandten Enden der Magnete werden an den ZEUS Speichenplatten aufgehängt. Die Aufhängung ist mit einer Steuerung versehen, die es während des Luminositätsbetriebes erlaubt, die Magnete innerhalb von etwa 0.3 mm zu verschieben. Die Steuerung dazu wird in Zusammenarbeit mit der Gruppe MDI entwickelt und gebaut.

Um ZEUS an die neuen Maschinenkomponenten anschließen zu können, musste das ZEUS-Unterjoch um 10 mm zur Ringaußenseite verschoben werden.

Neben den Vorbereitungen für die Luminositätserhöhung fanden Reparaturen am Kalorimeter, dem Vorwärtsdetektor, den Vorwärts- und Barrel-Myonkammern, dem Backing Kalorimeter und dem Hadron-Elektron Separator statt.

In Verbindung mit der Erhöhung der Luminosität von HERA sind mehrere Verbesserungen des ZEUS-Detektors geplant. Es sind dies der Bau eines Mikro-Vertex-Detektors (MVD) aus Siliziumstreifen-zählern und gleichzeitig eines neuen Stahlrohres, das Ersetzen der Übergangsstrahlungskammern im Vorwärtsspurendetektor durch Straw Tubes sowie der Neubau und die Erweiterung des Luminositäts-Messsystems. Diese neuen Detektorkomponenten werden im Frühjahr 2001 eingebaut.

## Neue Detektorkomponenten

### Mikro-Vertex-Detektor

Nach dem Umbau zur HERA-Luminositätserhöhung wird ZEUS ein Mikro-Vertex-Detektor (MVD) für die allgemeine Verbesserung der Spurvermessung und im Besonderen zur Erkennung von Sekundärvertices zur Verfügung stehen. Der Detektor besteht aus 712 Siliziumdioden mit zusammen etwa 210 000 Auslesekanälen. Abbildung 17 zeigt eine Hälfte des Mikro-Vertex-Detektors mit den Vorwärtsmodulen im Vordergrund.

Das Jahr 2000 stand für den MVD im Zeichen der vollen Produktionsrate für alle Komponenten bei allen

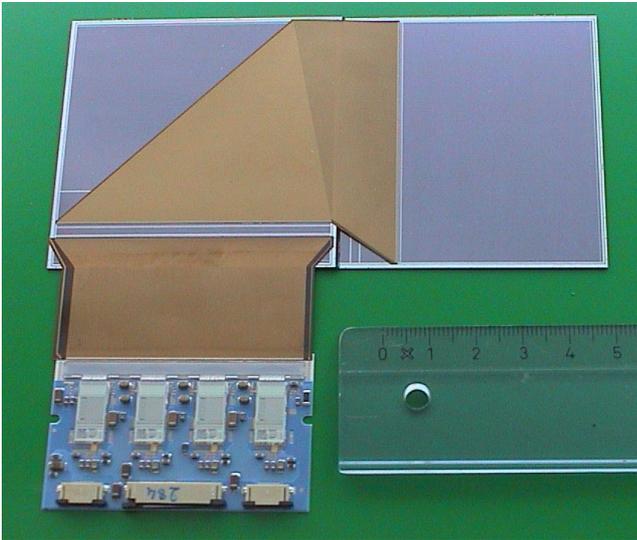


Abbildung 18: Ein Halbmodul des Barrels des Mikro-Vertex-Detektors, bestehend aus zwei Dioden, Kaptonfolien und Hybrid.

beteiligten Instituten. NIKHEF ist verantwortlich für die Präzisionsmechanik, den Bau der Leitern, den Zusammenbau des Gesamtdetektors und für das Kühlsystem, Oxford für die interne Laser-Vermessung und die Kabelverbindungen, UCL für die Kontroll- und Clocksignalverteilung, Padova für die Auslese-Hybride, Torino für die Niedervolt-Spannungsversorgung und KEK für die ADCs.

In Zusammenarbeit mit dem II. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg fand bei DESY in Hamburg und Zeuthen die Produktion der eigentlichen Siliziumdetektormodule statt.

Für den Barrelteil wurden jeweils zwei Dioden zu sogenannten Halbmodulen (Abb. 18) präzise verklebt, für den Vorwärtsteil (Abb. 19) wurden Kunststoffteile zur späteren Befestigung an die Dioden geklebt. Für die elektrischen Verbindungen wurden dünne Kaptonfolien mit aufgalvanisierten Kupferbahnen auf die Dioden geklebt und an die Dioden gebondet. Dabei wurden fast eine Million Bonds in Al-Dünndraht-Technik gesetzt. Darüber hinaus waren DESY und die Universität Bonn für die Beschaffung der Spannungsversorgung für die Verarmungsspannung verantwortlich.

Nachdem im Juli 2000 alle 300 Halbmodule mit Ersatzteilen bei NIKHEF angeliefert worden waren, konnte

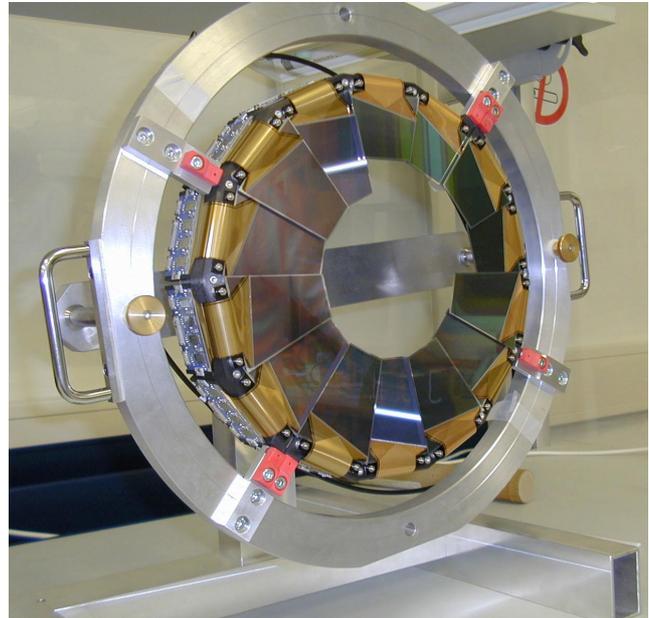


Abbildung 19: Ein Ring mit Vorwärtsmodulen. Um Platz für das elliptische Strahlrohr zu haben, sind einige Module verkürzt.

dort die Produktion aller Leitern, der Haltestruktur für jeweils fünf Module, bis zum September abgeschlossen werden. Danach begann dort die Montage und Vermessung der Leitern im Tragezylinder. Parallel dazu lief in Hamburg die Produktion der Vorwärtsmodule, die nach Montage, Einjustierung und Vermessung auf den Tragerringen mit der Lieferung von vier bestückten Ringen nach NIKHEF im November abgeschlossen wurde. Am 12. Dezember wurde die vollständig bestückte obere Hälfte des MVD in Hamburg angeliefert. Erste Tests zeigten, dass alle Module den Transport gut überstanden hatten und voll funktionsfähig waren. Mit der internen Laser-Vermessung wurde verifiziert, dass auch die Mechanik sich nicht verändert hatte.

Das System und die Software zur Datenauslese, Steuerung und Überwachung des Detektors sind vorhanden und werden zur Zeit intensiv erprobt und optimiert. Die Rechner zur Realisierung des Spurtriggers wurden von der Yale University bereitgestellt. Sie sind bei DESY eingetroffen und werden zur Zeit konfiguriert. Die Entwicklung der Software ist weit fortgeschritten.

An der zur Datenauswertung benötigten Software wird intensiv gearbeitet. Es wurden große Fortschritte bei

der Entwicklung der Programme zur Spurerkennung und zum Spurfit gemacht, mit dem Ziel, am Ende einen gemeinsamen Spurfit aller inneren Spurdetektoren zur Verfügung zu haben. Darüber hinaus wurde eine auf GEANT beruhende Simulation des Detektors entwickelt.

Seit September wurde in der JADE-Halle ein Testgebiet vorbereitet, in dem der MVD in seiner endgültigen Form aufgebaut und erste Erfahrungen mit dem Gesamtsystem gesammelt werden sollen. Fast alle Komponenten der Ausleseelektronik sind bis zum Jahresende geliefert worden. Seit November stand auch das Wasserkühlungssystem für die Auslese-Hybride zur Verfügung. Damit konnten zum ersten Mal größere Teile der Auslese gleichzeitig betrieben werden.

Mitte Februar 2001 wird die untere Hälfte des MVD fertig sein, zusammen mit den noch fehlenden Kontrolleinheiten. Damit kann ab Ende Februar mit dem Aus-testen des vollständigen MVD begonnen werden. Der Einbau in ZEUS ist für die zweite Märzhälfte vorgesehen.

Im Laufe des Berichtsjahres wurden weiterhin im Teststrahl Messungen an Prototyp-Modulen durchgeführt. Dabei stand neben der Erprobung der technischen Lösungen ein stabiler Rekonstruktions-Algorithmus im Vordergrund. Es hatte sich gezeigt, dass mit den üblichen Rekonstruktionsverfahren die Auflösung vom Auftreffort des Teilchens auf dem Siliziumdetektor abhängt. Der Hauptgrund für diese Ortsabhängigkeit der Auflösung sind die Extra-Kapazitäten der Bondpads auf den Detektoren. Diese Ergebnisse werden in der Entwicklung der Analysesoftware berücksichtigt.

## Straw Tube Tracker

Der ZEUS „Straw Tube Tracker“ (STT) wird gebaut, um die Spurrekonstruktion geladener Teilchen in Vorwärtsrichtung (Protonrichtung) zu verbessern. Er wird im Shutdown 2000/2001 im Rahmen des Umbaus von ZEUS für die HERA-Luminositätserhöhung eingebaut.

Eine Straw Tube (Strohalm) besteht aus einem Rohr aus dünner Kaptonfolie (120  $\mu\text{m}$  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 LHC entwickelt und zeichnet sich durch gute Ortsauflösung und geringe Hit-Multiplizität selbst bei hohem Untergrund aus.

Um Platz für den neuen Detektor zu schaffen, wird der zur Zeit im Vorwärtsdetektor eingebaute Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) entfernt. In zwei Schlitze von 20.8 cm Breite entlang des Strahls werden 48 Sektoren in zwei unterschiedlichen Größen eingesetzt. Jeder Sektor besteht aus 194 bzw. 266 Straw Tubes von 20 cm bis 102 cm Länge, die in drei Lagen angeordnet sind. Der Bau des Detektors wurde im Juli 1998 genehmigt. Nachdem ein Prototyp gebaut und erfolgreich getestet worden war, wurden die Röhren hergestellt und zu Sektoren zusammengeklebt. Ende 1999 wurde mit dem Einbau der Signaldrähte in Moskau (MEPHI), Toronto (York University), Freiburg (Universität Freiburg) und Hamburg (DESY, Universitäten Bonn und Hamburg) begonnen. Die Universität Siegen hat die Hochspannungsverteilungen gebaut.

Im Jahr 2000 wurden alle 50 Sektoren verdrahtet, mit Hochspannungs- und Gasanschlüssen versehen und mit einer  $^{55}\text{Fe}$ -Quelle getestet. Danach wurden die Sektoren zur Erhöhung der mechanischen Stabilität in dünne Kästen aus Kohlefaser geklebt. Während der Produktion stellten sich die Gewährleistung der Gasdichtigkeit der Sektoren sowie die Montage der übrigen Anbauteile als langwieriger heraus als geplant. Die Montage der Signaldrähte dagegen erwies sich als schneller und einfacher als gedacht.

Alle Sektoren sind mittlerweile fertig gebaut und bei DESY eingetroffen. Bei DESY werden die Sektoren zunächst in 17  $\mu\text{m}$  dicke Kupferfolie eingepackt, um sie von Störsignalen abzuschirmen. Die Frontend-Ausleseelektronik wird dann direkt an die Sektoren montiert. Sie besteht aus zwei Boards. Das Multiplex-Board befindet sich unmittelbar am Ende der Straw Tubes, das Treiber-Board am Rand des Detektors. Abbildung 20 zeigt einen vollständigen STT Sektor mit montierter Frontend-Elektronik.

Die Elektronik ist so ausgelegt, dass mit ihr die 11 000 Straw Tubes des Detektors mit den 2000 Kanälen des Analog-Digital-Wandler-Systems des ursprünglichen TRD ausgelesen werden können. Das Design der Elektronik wurde im Berichtsjahr fertiggestellt und ausführlich getestet. Dazu wurde die Elektronik auch auf ei-

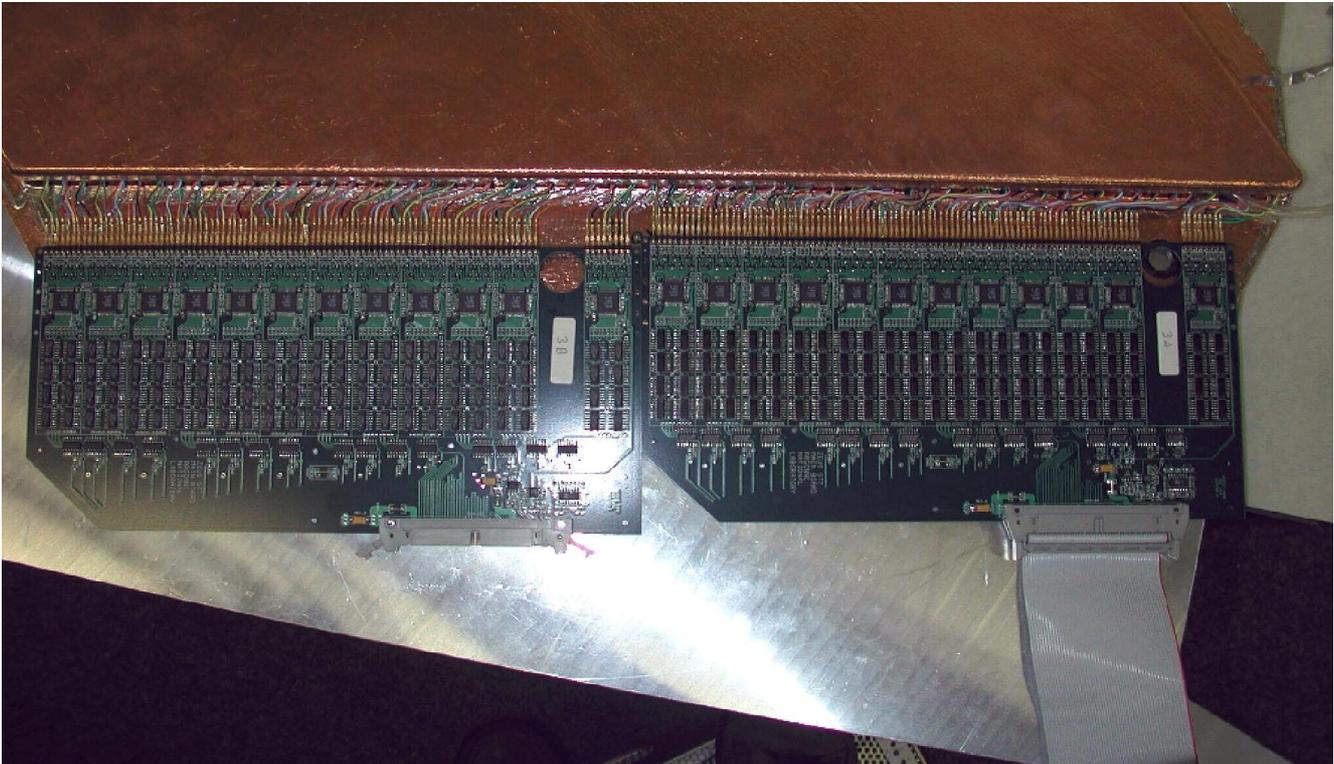


Abbildung 20: Ein STT Sektor mit montierter Frontend-Elektronik.

nem Prototyp-Sektor montiert und im DESY-Teststrahl getestet. Die Produktion aller Komponenten ist mittlerweile beendet und die Lieferung der letzten Boards ist für Ende Februar vorgesehen. Am Entwurf und Bau der Elektronik waren das Argonne National Laboratory, die Tel Aviv University und die Universität Siegen beteiligt.

Das Gestell zur Montage der Sektoren im Vorwärtsdetektor wurde in den Universitäten Bonn und Freiburg konstruiert und gebaut. Im Oktober 2000 wurde der Vorwärtsdetektor aus ZEUS ausgebaut, der TRD entfernt und der restliche Vorwärtsdetektor für den Einbau des STT vorbereitet.

Große Fortschritte wurden bei den Programmen zur Rekonstruktion der Hits und der Spurfindung gemacht. Auch die Monte Carlo-Simulation wurde verbessert. Für die kommende Datennahmeperiode wird ZEUS mit dem STT einen Detektor haben, der zuverlässig Punkte zur Spurrekonstruktion im Vorwärtsbereich liefert, die mit den gemessenen Koordinaten der anderen Spurdetektoren kombiniert werden können.

## Luminositätsmonitor

Zur Messung der HERA-Luminosität wird der Bethe-Heitler Prozess  $e p \rightarrow e p \gamma$  verwendet. Die erzeugten Photonen werden mit einem elektromagnetischen Kalorimeter nachgewiesen, das sich im HERA-Tunnel in 107 m Abstand von der ZEUS Wechselwirkungszone befindet. Bisher wurde eine Genauigkeit der Luminositätsmessung von etwa 1.5% erreicht. Die gleiche Präzision wird auch nach der Luminositätserhöhung verlangt.

Die Luminositätsmessung wird nach der HERA-Luminositätserhöhung aus mehreren Gründen wesentlich erschwert. Die stärkere Ablenkung des Elektronenstrahls in der Wechselwirkungszone führt zu einer Erhöhung der charakteristischen Energie der Synchrotronstrahlung und zu einer Erhöhung der Anzahl der Synchrotronstrahlungs-Photonen um einen Faktor sieben. Gleichzeitig wird sich die Anzahl von Bremsstrahlungs-Photonen (Bethe-Heitler Prozess) um das Fünffache erhöhen. Die erhöhte Photonrate erhöht

die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Kollision der Elektronen- und Protonenstrahlen mehrere Photonen abgestrahlt werden und gleichzeitig im Photonkalorimeter nachgewiesen werden und so zu einer Verfälschung der Luminositätsmessung führen. Ohne eine Abschirmung von mehreren Strahlungslängen Dicke würde das jetzige Photonkalorimeter innerhalb kurzer Zeit durch Strahlung beschädigt werden. Eine dickere Abschirmung verschlechtert aber die Energieauflösung des Kalorimeters und macht eine präzise Luminositätsmessung unmöglich.

Der neue Luminositätsmonitor muss auch unter den erschwerten Bedingungen eine präzise Messung der Luminosität ermöglichen. Außerdem ist es sinnvoll, zwei voneinander unabhängige Messmethoden mit unterschiedlichen systematischen Fehlern zu verwenden.

Das bisherige Photonkalorimeter wird durch ein neues Kalorimeter (Szintillator-Blei Sandwich) mit strahlungshartem Szintillator ersetzt. Zur Reduzierung des Synchrotronstrahlungsuntergrundes 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 aus Aerogel befindet. Die niederenergetischen Photonen der Synchrotronstrahlung werden in den Cherenkov Detektoren nicht nachgewiesen. Der erste Teil des elektromagnetischen Schauers der hochenergetischen Bethe-Heitler Photonen wird dagegen im Filter gemessen und zur Korrektur der Energiemessung im Kalorimeter verwendet.

Das neue Kalorimeter und die beiden Cherenkov Detektoren sind inzwischen gefertigt und im DESY-Teststrahl untersucht worden. Die Ergebnisse der Teststrahlmessungen zeigen, in sehr guter Übereinstimmung mit Monte Carlo Studien, dass die Energieauflösung des Photonkalorimeters mit aktivem Filter entscheidend verbessert wird.

Eine zweite, unabhängige Luminositätsmessung wird mit einem Elektron-Positron Paarspektrometer durchgeführt. Als Konversionstarget der Bethe-Heitler Photonen dient das Austrittsfenster in 92 m Abstand vom Wechselwirkungspunkt. Die erzeugten Elektron-Positronpaare werden durch einen Dipolmagneten abgelenkt und mit zwei kleinen Kalorimetern, die unmittelbar vor dem Photonkalorimeter angeordnet sind, gemessen. Als Detektoren werden die beiden Module

des bisherigen Strahlrohr-Kalorimeters mit geringen Modifikationen wieder verwendet. Der Vorteil dieser Messmethode besteht in einer entsprechend geringeren Anzahl von Photonen im Spektrometerdetektor aufgrund der geringen Konversionswahrscheinlichkeit, das heißt es gibt keine Mehrfachphotonen, Synchrotronstrahlungsuntergrund und Strahlungsschäden.

Zur Bestimmung der Akzeptanz und der Eichung des Photonkalorimeters und des Spektrometers wird ein kleines elektromagnetisches Kalorimeter verwendet, der sogenannte „6-m-Tagger“, mit dem das gestreute Elektron in Koinzidenz mit dem Photon gemessen wer-

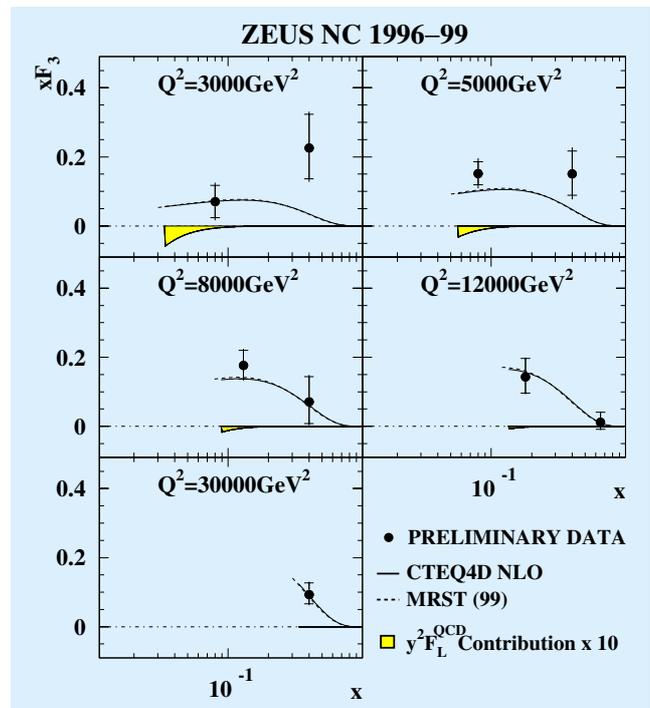


Abbildung 21: Die Messung der Proton-Strukturfunktion  $x F_3$ , die aus dem Vergleich vom  $e^+ p$ -Streuquerschnitt mit dem  $e^- p$ -Streuquerschnitt bestimmt wurde. Die Abhängigkeit von der Bjorken- $x$ -Variablen bei festen  $Q^2$ -Werten zwischen  $3 \times 10^3 \text{ GeV}^2$  und  $3 \times 10^4 \text{ GeV}^2$  wird gezeigt. Eine gute Übereinstimmung mit NLO-QCD-Berechnungen („Next to Leading Order“), die die CTEQ4D-Partondichtefunktionen verwendet haben, wird beobachtet. Die gelben Regionen zeigen den Beitrag von der in der Quantenchromodynamik berechneten longitudinalen Strukturfunktion  $F_L$ , skaliert um einen Faktor 10.

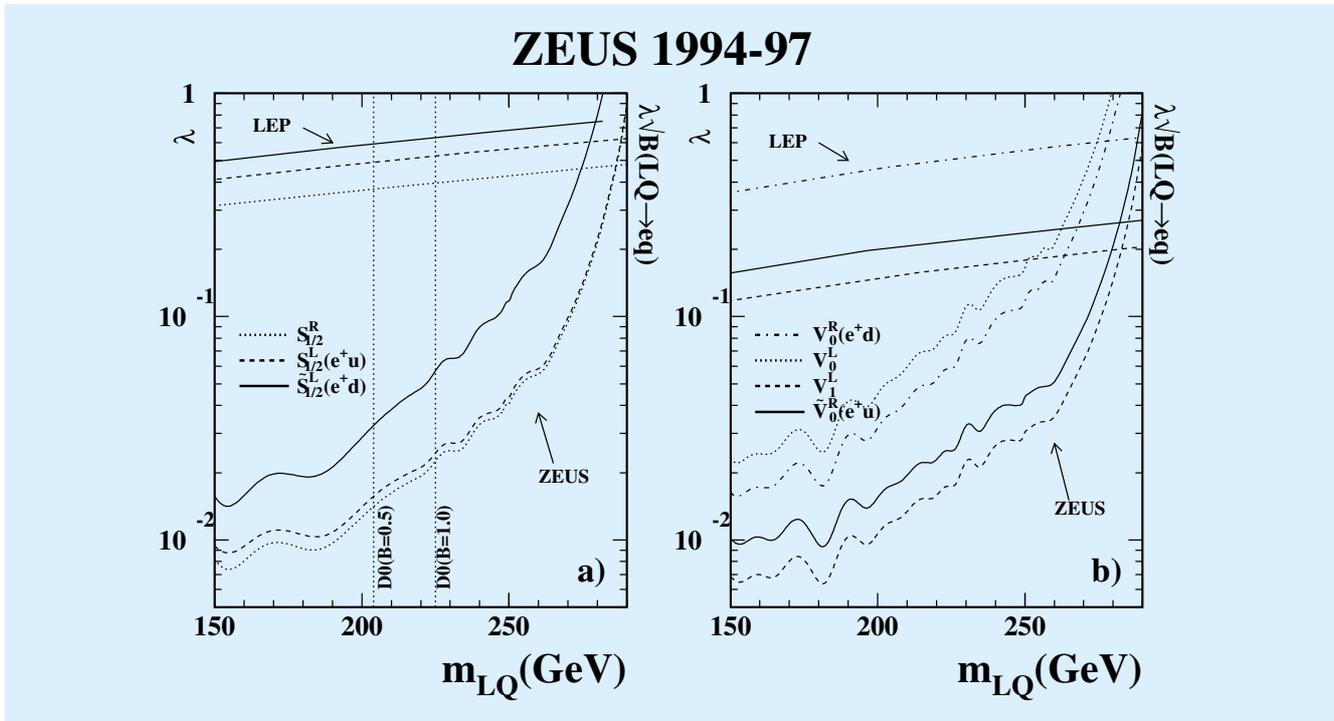


Abbildung 22: Empfindlichkeitsgrenzen auf die Leptoquark-Kopplungsstärke für LQ mit a) Spin 0 und b) Spin 1, als Funktion der angenommenen LQ-Masse. Die ausgeschlossenen Bereiche liegen oberhalb der LEP- und ZEUS-Kurven und links von den Tevatron-Grenzen (D0), die von der Annahme über das  $LQ \rightarrow eq$  Verzweigungsverhältnis  $B$  direkt abhängen.

den kann. Ein Prototyp dieses Taggers ist im DESY-Teststrahl untersucht worden. Der Bau des Taggers ist zur Zeit in Vorbereitung.

## Physikalische Ergebnisse

Eine Auswahl von im Zeitraum dieses Jahresberichtes veröffentlichten physikalischen Ergebnissen wird im Folgenden vorgestellt.

### Messung der Proton-Strukturfunktion $xF_3$

Die im Standard-Modell der Teilchenphysik vorausgesetzte und experimentell beobachtete Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Naturkräfte hat als Folge einen Beitrag zum  $e p$ -Wirkungsquerschnitt,

der die Spiegelsymmetrie verletzt. Dieser paritätsverletzende Anteil drückt sich durch die Proton-Strukturfunktion  $xF_3(x, Q^2)$  aus, die sowohl durch die Mischung der Amplituden für Photon- und Z-Boson-Austausch als auch durch die Amplitude für Z-Boson-Austausch allein entsteht. Die Daten entsprechend einer integrierten Luminosität von  $16 \text{ pb}^{-1}$ , die ZEUS 1998–1999 mit Elektronenstrahl aufgezeichnet hat, ermöglichten eine präzise Messung des  $e^-p$ -Streuquerschnittes, der mit einer Messung des  $e^+p$ -Streuquerschnittes verglichen wurde, um aus der Differenz den paritätsverletzenden Anteil zur Proton-Strukturfunktion zu ermitteln. Abbildung 21 zeigt das Resultat zusammen mit der Vorhersage des Standard-Modells, bei der aktuelle Parametrisierungen der Partondichtefunktionen zur Berechnung von  $xF_3$  verwendet wurden. Die beobachtete Übereinstimmung liefert einen weiteren überzeugenden Beleg für das Standard-Modell im kinematischen Bereich der elektroschwachen Vereinigung.

## Suche nach einer Resonanz in den Endzuständen $e^+$ +Jet und $\bar{\nu}$ +Jet

Die Suche nach Phänomenen jenseits des Standard-Modells ist ein wesentlicher Bestandteil des Physikprogramms bei HERA, da die hohe Energie der Strahlen einen Blick in bisher unerforschte kinematische Bereiche erlaubt.

Als einziger Speicherring mit hochenergetischen Lepton- und Hadronstrahlen ist HERA das am besten geeignete Labor, nach den postulierten Leptoquarks zu suchen. Diese stellen Zustände dar, die aus den fundamentalen Quark- und Lepton-Feldern bestehen, und deshalb bei HERA durch Quark-Lepton-Fusion direkt produziert werden können. Die ZEUS-Kollaboration hat nach solchen Leptoquark-Zuständen gesucht, wobei die Ereignis Selektion durch die typischen Zerfalls-signaturen bestimmt wurde. Leptoquarks, die in  $e^+p$ -Wechselwirkungen erzeugt werden, können entweder in  $e^+q$  oder in  $\bar{\nu}q$  zerfallen, wobei das Quark als Hadron-Jet im Detektor erscheint. Die Herausforderungen an Detektorleistung und Analysealgorithmen sind in den beiden Fällen sehr unterschiedlich. Im ersten Fall ist ein hochenergetisches Positron mit hohem Transversalimpuls für den Zerfall kennzeichnend. Im anderen Fall werden die Ereignisse durch die anscheinend fehlende Energie-Impuls-Erhaltung erkannt, die durch das nicht nachweisbare Antineutrino zustande kommt.

Abbildung 22 vergleicht die Empfindlichkeit der ZEUS-Messung für den  $e^+$ +Jet-Zustand mit Ergebnissen aus  $e^+e^-$ -Wechselwirkungen bei LEP und  $p\bar{p}$ -Kollisionen vom Tevatron für Skalar- und Vektor-Leptoquarks. Maß für diese Sensitivität ist die kleinste Kopplungsstärke  $\lambda$ , die noch zu einem signifikanten Signal führt. Am Tevatron, an dem Leptoquarks nur durch Paarproduktion erzeugt werden können, besteht keine Empfindlichkeit auf diese Kopplungsstärke, aber die Aussagekraft wird vom unbekanntem Verzweigungs-verhältnis  $LQ \rightarrow e q$  wesentlich beeinflusst. Auch in dem für das Tevatron günstigsten Fall, in dem die Leptoquarks zu 100% in  $e q$  zerfallen, sind die ZEUS-Grenzen oberhalb einer Leptoquark-Masse von 225 GeV empfindlicher.

Im Vergleich zu den LEP-Ergebnissen zeigt die ZEUS-Analyse eine höhere Empfindlichkeit bis etwa 280 GeV, wo die Begrenzung durch die  $e p$ -Schwerpunktsenergie einsetzt.

## Messung azimuthaler Asymmetrien in tiefunelastischer Streuung

Dieselbe hohe statistische Genauigkeit, die die HERA-Experimente H1 und ZEUS in der Messung der Proton-Strukturfunktion  $F_2(x, Q^2)$  erreicht haben, schlägt sich auch in der Präzision, mit der die Eigenschaften des hadronischen Endzustands in der tiefunelastischen Streuung studiert werden können, nieder. So konnten das Moment  $\langle \cos \phi \rangle$  und zum ersten Mal das Moment  $\langle \cos 2\phi \rangle$ , bei dem  $\phi$  der Winkel zwischen der Elektronstrebene und der Produktionsebene für Hadronen im hadronischen Schwerpunktsystem ist, präzise gemessen werden. Abbildung 23 zeigt Beispiele der Winkelverteilungen, aus denen die Asymmetrien ermittelt wurden. Das Moment  $\langle \cos 2\phi \rangle$  ist besonders interessant, weil die

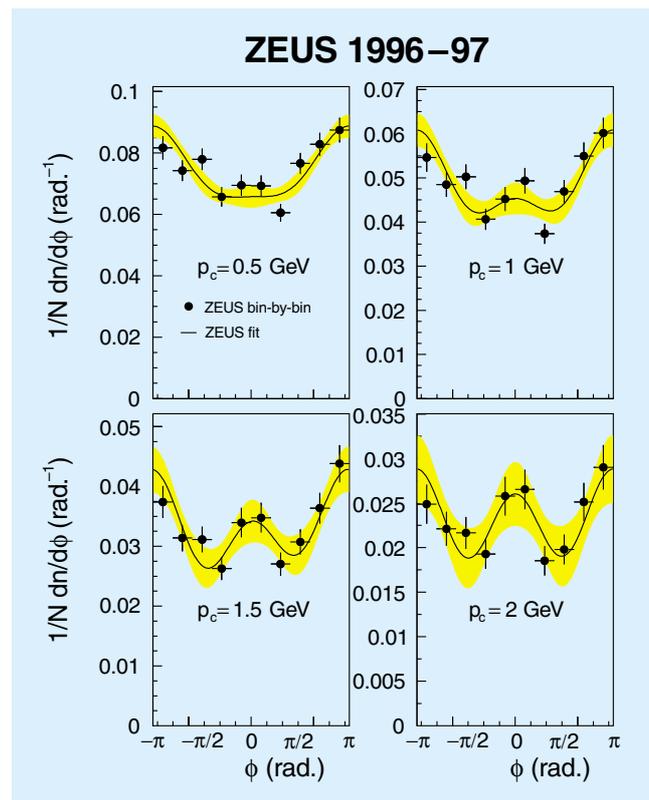


Abbildung 23: Verteilungen des azimuthalen Winkels  $\phi$  im hadronischen Schwerpunktsystem zwischen der Elektronstrebene und der Produktionsebene von Hadronen in der tiefunelastischen Streuung. Die Verteilungen sind über den Transversalimpuls der Hadronen ab dem Mindestwert  $p_c$  integriert.

## ZEUS 1995

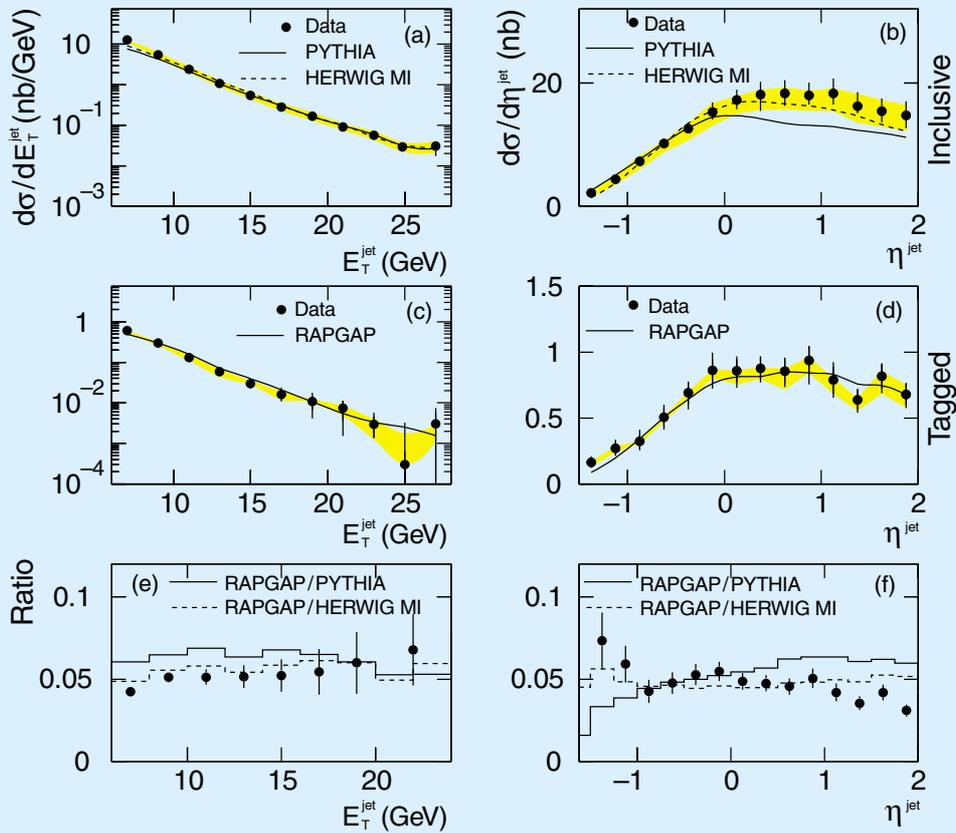


Abbildung 24: Die differentiellen Wirkungsquerschnitte in  $E_T^{\text{jet}}$  und  $\eta^{\text{jet}}$  für inklusive Photoproduktionsprozesse (a) (b) und für Prozesse, in denen ein Neutron  $n$  in Vorwärtsrichtung nachgewiesen wurde (c) (d), zusammen mit den daraus ermittelten Verhältnissen (e) (f). Der kinematische Bereich dieser Messungen ist durch  $E_T^{\text{jet}} > 6 \text{ GeV}$ ,  $|\eta^{\text{jet}}| < 2$ ,  $Q^2 < 4 \text{ GeV}^2$ ,  $0.2 < y < 0.8$ ,  $E_n > 400 \text{ GeV}$  und  $\theta_n < 0.8 \text{ mrad}$  gegeben. Die schattierten Bereiche zeigen die systematische Unsicherheit, die durch die Ungewissheit in der Energieskala des zentralen Kalorimeters zustande kommt. Das hier verwendete Simulationsprogramm RAPGAP beinhaltet ein Pion-Austauschmodell, das auf Faktorisierung des Pionflusses und dessen Partondichten basiert.

störungstheoretisch berechenbaren Beiträge dominieren. Die ZEUS-Messungen zeigen, dass dieses Moment mit dem Transversalimpuls des erzeugten Hadrons ansteigt, wie es von störungstheoretischen Rechnungen der Quantenchromodynamik vorhergesagt wird. Damit wurde gezeigt, dass die beobachteten azimuthalen Asymmetrien einen mit perturbativer Quantenchromodynamik beschreibbaren Anteil haben.

### Photoproduktion von Dijets mit einem Neutron in Vorwärtsrichtung

Die bei HERA gewonnenen Messergebnisse haben sich von Anfang an als besonders zum Studium von Phänomenen der diffraktiven Physik geeignet erwiesen. Das Vorwärts-Neutronkalorimeter bei ZEUS hat Untersu-

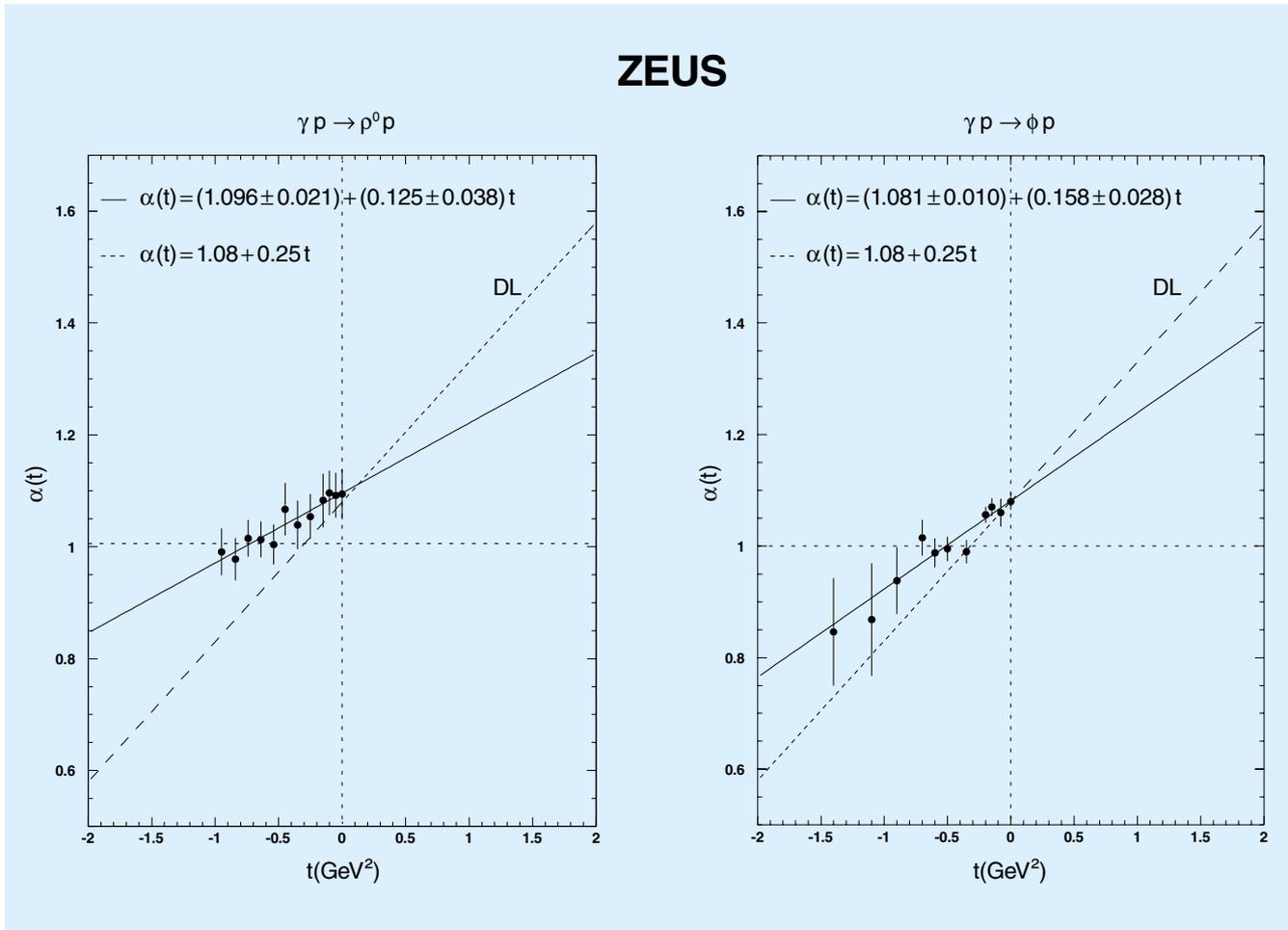


Abbildung 25: Messung der Pomeron-Trajektorie aus den Reaktionen  $\gamma p \rightarrow \rho^0 p$  und  $\gamma p \rightarrow \phi p$ . Die Gerade zeigt das Ergebnis eines linearen Fits. Zum Vergleich zeigt die gestrichelte Linie die Pomeron-Trajektorie, die in der Hadron-Hadron-Streuung gemessen wurde.

chungen von Ladungsaustauschprozessen ermöglicht, insbesondere solcher, in denen zwei Hadron-Jets bei hohem Transversalimpuls von quasi-reellen Photonen erzeugt werden.

Abbildung 24 vergleicht die differentiellen Wirkungsquerschnitte in  $E_T^{\text{jet}}$  und  $\eta^{\text{jet}}$  für inklusive Photoproduktions-Prozesse mit solchen, in denen ein Neutron in Vorwärtsrichtung beobachtet wird.

Die Ergebnisse dieser Studie weisen darauf hin, dass die Daten mit einer Faktorisierungshypothese über Pion-Austausch konsistent sind.

### Photoproduktion von Vektormesonen mit hohem Transversalimpuls

Die ZEUS-Kollaboration führt ein Messprogramm zur Untersuchung der Erzeugungsmechanismen von Vektormesonen durch mit dem Ziel, die Gültigkeit von störungstheoretischen Berechnungen der Quantenchromodynamik für exklusive und semi-exklusive Prozesse zu prüfen. Die für derartige Rechnungen benötigte harte Skala kann entweder durch die Photonvirtualität  $Q^2$ , den an das Proton übertragenen Viererimpuls  $t$  oder die Vektormeson-Masse  $M_V$  gegeben sein.

Beim ZEUS-Experiment wird ein Kleinwinkel-Elektron-Kalorimeter verwendet, um die Photonvirtualität auf  $Q^2 < 0.02 \text{ GeV}^2$  zu begrenzen. Auf diese Weise ist es möglich, den Impulstransfer  $t$  und die Masse  $M_V$  als harte Skalen zu testen.

In der Impulstransfer-Region  $0.5 < |t| < 3 \text{ GeV}^2$  konnten die Mechanismen der elastischen Photoproduktion und der proton-dissoziativen Photoproduktion, bei der die invariante Masse des dissoziierten Protonsystems begrenzt ist auf  $M_N < 7 \text{ GeV}$ , verglichen und so Informationen über den Formfaktor des Protons erzielt werden. Der differentielle Wirkungsquerschnitt  $d\sigma/dt$  für elastische  $\rho^0$ -Erzeugung zeigt in diesem  $t$ -Bereich eine deutliche Abweichung von der bei niedrigerem  $|t|$  beobachteten exponentiellen Abhängigkeit. Während diese Ergebnisse keine eindeutige Gültigkeit des Impulstransfers  $t$  als störungstheoretisch relevante Skala zeigen, konnte die relevante Pomeron-Trajektorie  $\alpha_P(t)$  aus der Energieabhängigkeit des elastischen Produktionsquerschnittes als Funktion von  $t$  gemessen werden. Die in Abbildung 25 dargestellten Ergebnisse aus den  $\rho^0$ - und  $\phi$ -Daten weisen auf eine deutlich schwächere  $t$ -Abhängigkeit der Trajektorie hin als jene, die in der Hadron-Hadron-Streuung gemessen wurde.

## Messung von exklusiver Elektroproduktion des $\omega$ -Mesons

Einen weiteren Beitrag zum Messprogramm der Vektormeson-Erzeugung leistete die Studie zur Elektroproduktion von  $\omega$ -Mesonen. Diese erste Untersuchung bei hoher  $\gamma^*p$ -Schwerpunktsenergie setzte Identifikationsalgorithmen von  $\pi^0$ -Mesonen im Urkalorimeter voraus. Im  $\pi^+\pi^-\pi^0$ -Massenspektrum wurden deutliche Signale sowohl für  $\omega$ - als auch für  $\phi$ -Zerfälle gefunden.

Abbildung 26 zeigt die daraus ermittelten Verhältnisse von  $\omega$ - zu  $\rho^0$ - bzw.  $\phi$ - zu  $\rho^0$ -Produktion als Funktion der Photonvirtualität. Diese Ergebnisse zeigen, dass die SU(4)-Symmetrie im Produktionsverhältnis, die schon bei kleinen Werten der Photonvirtualität in  $\omega$ -Elektroproduktion beobachtet wurde, auch bei  $Q^2 \simeq 12 \text{ GeV}^2$  gilt, im Gegensatz zur  $\phi$ -Elektroproduktion, wo erst bei  $Q^2 \simeq 4 \text{ GeV}^2$  der SU(4)-Symmetrie-Wert erreicht wird. Das Produktionsverhältnis von  $J/\psi$  zu  $\rho^0$  ist, obwohl steil mit  $Q^2$

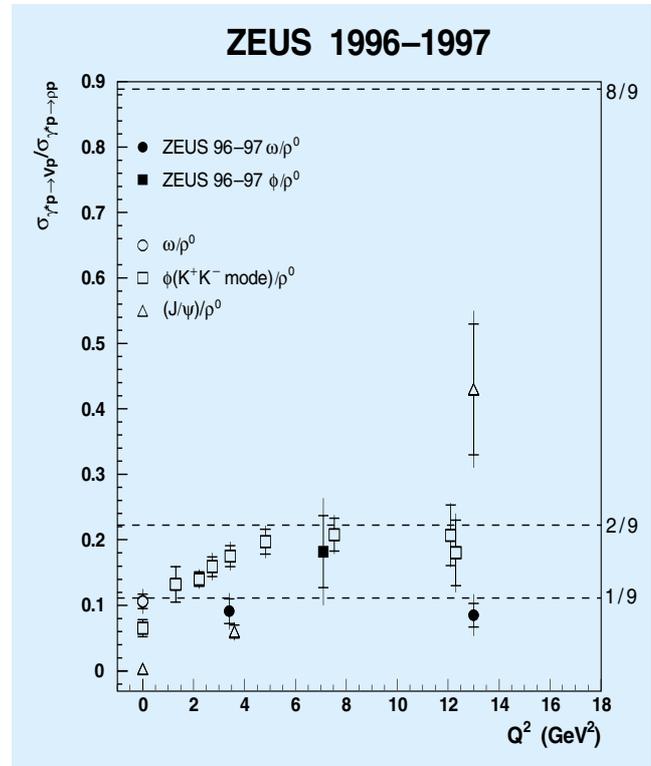


Abbildung 26: Die Verhältnisse der gemessenen  $\omega$ - und  $\phi$ -Elektroproduktionsquerschnitte zu dem für  $\rho^0$ -Mesonen als Funktion der Photonvirtualität. Die neuen Messwerte sind durch die vollen Symbole dargestellt. Während das Verhältnis der  $\phi/\rho^0$ -Erzeugung den SU(4)-symmetrischen Wert erst bei höheren  $Q^2$  erreicht, bleibt das Erzeugungsverhältnis von  $\omega/\rho^0$  bei dem entsprechenden SU(4)-Wert unabhängig von  $Q^2$ . Das  $(J/\psi)/\rho^0$  Produktionsverhältnis steigt steil mit  $Q^2$  an, bleibt aber selbst bei  $Q^2 \simeq 13 \text{ GeV}^2$  noch einen Faktor zwei kleiner als die SU(4)-Vorhersage.

ansteigend, selbst bei  $Q^2 \simeq 13 \text{ GeV}^2$  noch um einen Faktor zwei kleiner als die SU(4)-Vorhersage. Diese Beobachtungen deuten auf einen Produktionsmechanismus hin, der bei genügend hohem  $Q^2$  unabhängig von der erzeugten Quarksorte wird.

## Messung von inklusiver Elektroproduktion von $D_s^\pm$ -Mesonen

Im Rahmen der Untersuchung von inklusiven Produktionsprozessen schwerer Quarks wurde eine Messung

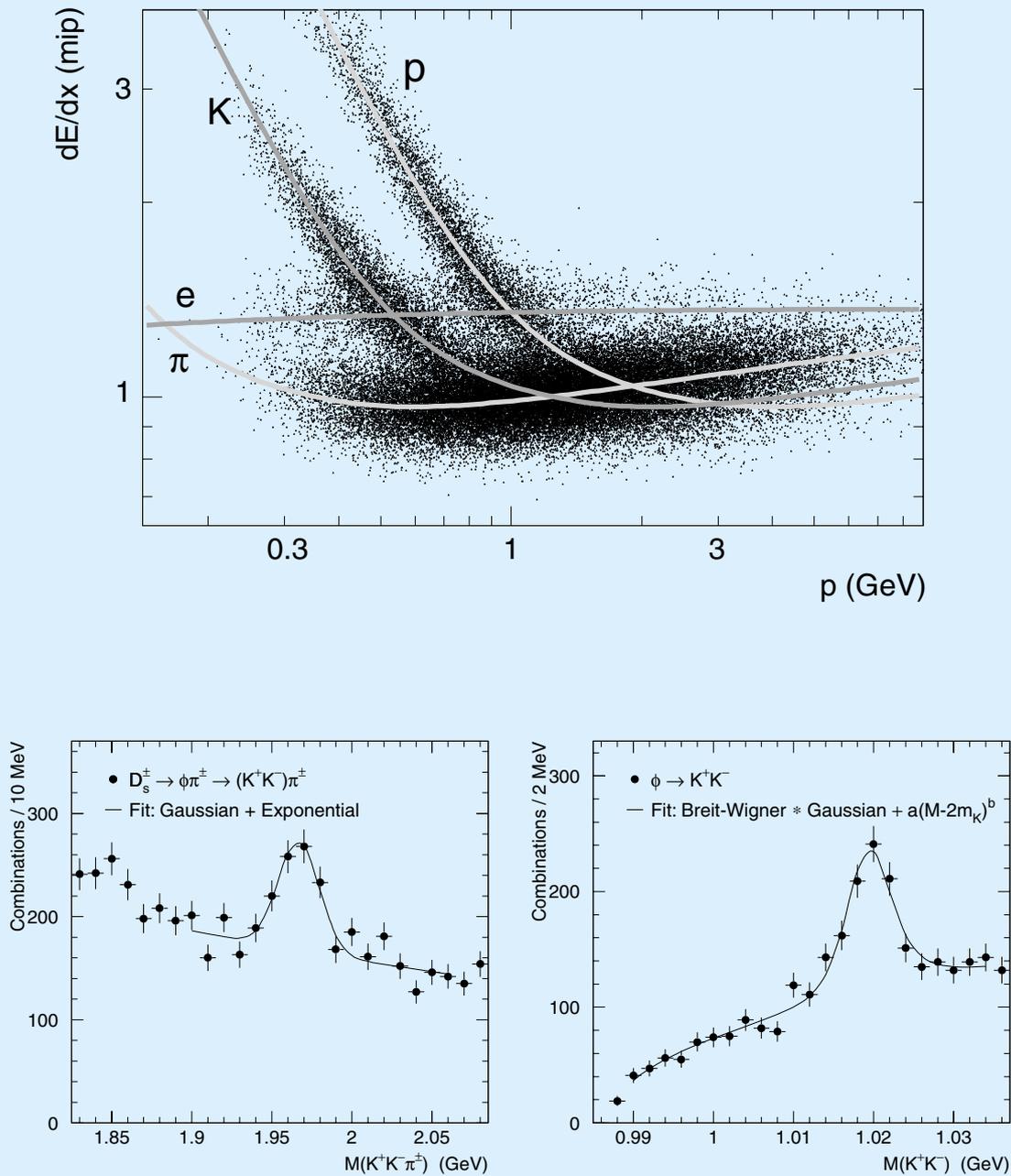


Abbildung 27: Normierte Energieverlustverteilungen in der zentralen Driftkammer. Eine deutliche Trennung von  $\pi$ ,  $K$  und  $p$  (oben) ermöglicht die Unterdrückung von kombinatorischem Untergrund in den invarianten Massenspektren, die zur Identifizierung von  $\phi$ - und  $D_s^\pm$ -Mesonen dienen (unten).

der Photoproduktion von  $D_s^\pm$ -Mesonen bei einer  $\gamma p$ -Schwerpunktsenergie von  $130 < W < 280$  GeV durchgeführt.

Die kombinatorischen Untergründe in den Massenspektren wurden durch Verwendung von  $dE/dx$ -Messungen in der zentralen Driftkammer unterdrückt (Abb. 27). Daraus ergibt sich das Verhältnis der Photoproduktionsquerschnitte von  $D_s^\pm$ - zu  $D^{*\pm}$ -Mesonen zu

$$0.41 \pm 0.07(\text{stat.})_{-0.05}^{+0.03}(\text{syst.}) \pm 0.10(\text{br.})$$

und ein Strangeness-Unterdrückungsparameter im Lund-String-Fragmentationsmodell von

$$\gamma_s = 0.27 \pm 0.05 \pm 0.07(\text{br.}) .$$

Dabei bezeichnet (br.) die Unsicherheit durch das hadronische Verzweigungsverhältnis der  $D_s^\pm$ -Mesonen in den gemessenen Zerfallskanal.

Dieses Ergebnis stimmt mit Messungen desselben Parameters für die Charm-Produktion in  $e^+e^-$ -Annihilationen überein. Das deutet darauf hin, dass die nicht perturbativ beschreibbare Hadronisierung der Charm-Quarks aus  $e^+e^-$  und  $e p$  Kollisionen nach den gleichen Prinzipien abläuft.

## Photoproduktion von B-Mesonen

Die Messung von  $dE/dx$  diente auch der Anreicherung eines Beauty-Signals, das zu einer Bestimmung des Wirkungsquerschnitts für die Photoproduktion von B-Mesonen führte. In Ereignissen mit zwei Jets und einem Elektron mit hohem Transversalimpuls konnte ein Überschuss beobachtet werden, der durch die semileptonischen Zerfälle von B-Mesonen verursacht wird. Abbildung 28 zeigt diesen Überschuss als Funktion vom Transversalimpuls  $p_T^{\text{rel}}$  des Elektrons be-

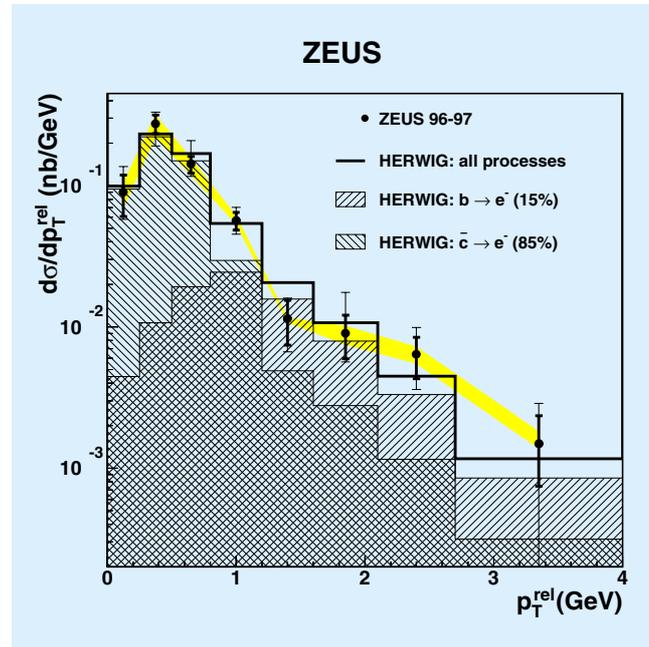


Abbildung 28: Der differentielle Wirkungsquerschnitt  $d\sigma/dp_T^{\text{rel}}$  für die Reaktion  $e^+ p \rightarrow e^+ + \text{dijet} + e^- + X$ .  $p_T^{\text{rel}}$  ist der Transversalimpuls des Elektrons bezüglich der am nächsten liegenden Jetachse. Die schattierte Region zeigt die Unsicherheit, die durch die Ungenauigkeit der Energieskala des Urkalorimeters bei der Messung der Elektronenenergie der semileptonischen Zerfälle von Charm- und Beauty-Mesonen entsteht. Das Ergebnis des HERWIG-Simulationsprogramms wurde um einen Faktor 3.8 skaliert, um diesen Vergleich mit den ZEUS-Daten zu erhalten.

züglich der am nächsten liegenden Jetachse. Die semileptonischen Zerfälle von Charm-Teilchen reichen allein nicht aus, um die gemessene Verteilung zu erklären. Der Beauty-Photoproduktionsquerschnitt, der mittels dieses Identifikationsalgorithmus bestimmt werden konnte, liegt etwas höher als das Resultat einer NLO-QCD-Berechnung, was auch am Tevatron in  $p\bar{p}$ -Wechselwirkungen beobachtet wurde.

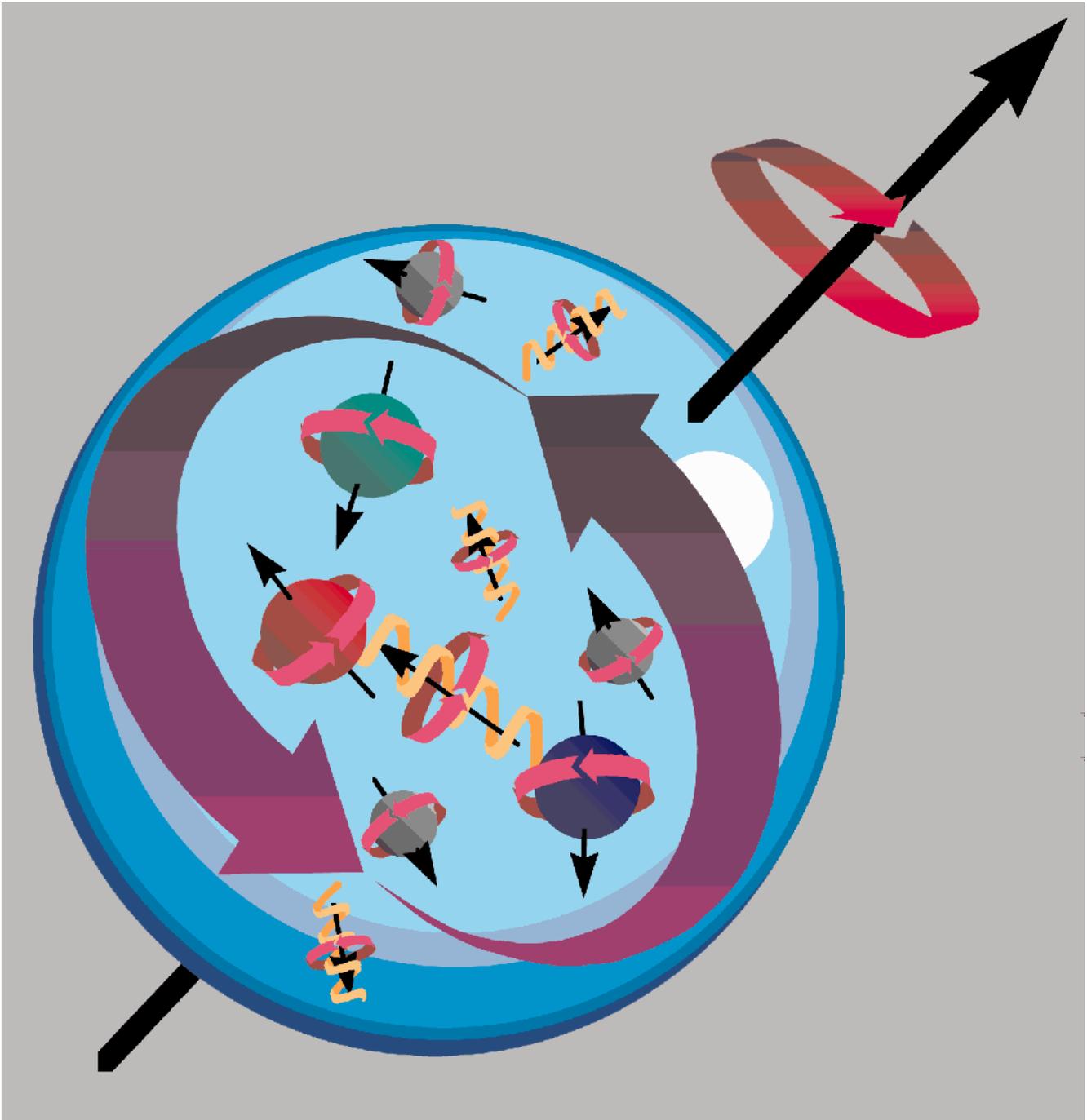


Abbildung 29: Eine schematische Darstellung des Nukleons mit all seinen Konstituenten und deren möglichen Spinorientierungen und Drehimpulsen.

# HERMES-Experiment

**Beteiligte Institute:** NIKHEF/Vrije Universiteit Amsterdam, Univ. of Michigan Ann Arbor, ANL Argonne, INFN Bari, Univ. of Colorado Boulder, MIT Cambridge, JINR Dubna, Univ. of Alberta Edmonton, Univ. Erlangen-Nürnberg, INFN Ferrara, INFN Frascati, Univ. Freiburg, Univ. Gent, DESY Hamburg, MPI Kernphys. Heidelberg, New Mexico State Univ. Las Cruces, Univ. Liverpool, Univ. of Wisconsin Madison, P.N. Lebedev Inst. Moscow, Univ. München, Caltech Pasadena, INFN Rome, St. Petersburg Nucl. Phys. Inst., Tokyo Inst. Tech., Univ. of Illinois Urbana-Champaign, Simon Fraser Univ. und TRIUMF Vancouver, Yerevan Phys. Inst., DESY Zeuthen.

**Sprecher:** E. Steffens, Univ. Erlangen-Nürnberg

Das Jahr 2000 markiert für HERMES das Ende der ersten sechsjährigen Betriebsphase mit longitudinal-polarisierten Targets, und es war gleichzeitig das bisher erfolgreichste Jahr der Datennahme.

Während des fast achtmonatigen Betriebs wurde mit polarisiertem Deuterium sowie unpolarisierten Targetgasen hoher Dichte gemessen. Auf Grund der Ende 1999 vorgenommenen Verbesserungen am polarisierten Target und des sehr zuverlässigen Betriebs von Maschine und Experiment konnte eine unerwartet große Menge polarisierter Daten hoher Qualität gewonnen werden.

Daneben wurde in der zweiten Hälfte der Periode ein Betriebsmodus eingeführt, bei dem die Elektronenfüllungen durch einstündige Operation mit unpolarisiertem Gas sehr hoher Dichte beendet wurden, was zu einer zusätzlichen großen Menge von „einfach-polarisierten“ Daten führte.

Nach Abschluss des Messbetriebs wurde das Experiment in die Parkposition gefahren und mit der Überholung der Magnetkammern begonnen. Am Target wurde die Umstellung auf transversal polarisierten Wasserstoff vorbereitet. Kernstück ist ein Haltefeldmagnet hoher Homogenität, der im Berichtsjahr ausgelegt wurde und 2001 gebaut und installiert werden soll.

Die Schwerpunkte der Analyse lagen im Jahr 2000 beim weitgehenden Abschluss der Untersuchungen

der Wasserstoffdaten (1996–97) und Aufbereitung zu Publikationen sowie bei ersten Analysen der Deuteriumdaten (1998–2000), deren Hauptmenge aus dem bisher erfolgreichsten Jahr 2000 stammt.

Eine neue Analyse der Protondaten hat dabei neue Werte für die Spinstrukturfunktion  $g_1^p$  im Bereich kleiner  $x$  erbracht, wo es bisher nur Daten des SMC-Experiments gab.

Weiterhin wurden am Proton erstmalig in einfach-polarisierten quasi-exklusiven Reaktionen azimutale Abhängigkeiten in der Verteilung führender Pionen oder reeller Photonen experimentell nachgewiesen. Dies sind starke Hinweise darauf, dass in der Leptonstreuung, und zu einem erheblichen Grad auch im HERMES-Experiment, neuartige Quark-Verteilungsfunktionen wie „Transversity“ oder „Skewed Parton Distributions“ gemessen werden können.

Im Bereich der Spinverteilungen für die einzelnen Quarks,  $u, \bar{u}, d, \bar{d}, s, \bar{s}$ , haben erste Analysen unter Einschluss der Deuteriumdaten die erheblichen Verbesserungen aufgezeigt, die durch die neuen Daten möglich sein werden. Weitere Untersuchungen wurden an Daten von schwereren Kernen gemacht. Sie erlauben Aussagen zu Fragen, wie nach der Absorption des virtuellen Photons durch ein Quark im Nukleon die Bildung von Hadronen und deren Abschwächung im ausgedehnten Kern erfolgt.

## Datennahme 2000

Die Messperiode Januar bis August 2000 war die bisher erfolgreichste seit der Inbetriebnahme des Experiments. Der hervorragende Betrieb von HERA und die hohe Zuverlässigkeit des HERMES-Spektrometers ermöglichten es, 6 Millionen tiefunelastische Streueignisse (DIS) am polarisierten Deuteriumtarget zu sammeln (Abb. 30). Während der Monate Juli und August wurde das polarisierte Deuteriumtarget nicht nur in den beiden vektorpolarisierten Kernzuständen betrieben, sondern auch im tensorpolarisierten Zustand. Das ermöglichte, eine weitere Million DIS Ereignisse zu sammeln, die Zugang zu der bisher völlig unbekanntem Strukturfunktion  $b_1$  geben.

Zusätzlich zur Datennahme mit dem polarisierten Deuteriumtarget wurde, wie auch in den vergangenen Jahren, wieder an verschiedenen unpolarisierten Targets gemessen. Dafür wurde am Ende jeder HERA Elektronenfüllung, beginnend von 14 mA Strahlstrom, das polarisierte Deuteriumgas durch unpolarisierte Gase mit einer 100-fachen Dichte im Vergleich zur polarisierten Gasdichte ersetzt. Diese hohen Targetdichten führten zu einer Reduktion der Elektronenstrahllebensdauer von 12 Stunden auf ungefähr eine Stunde. Der Verlust an Luminosität für H1 und ZEUS bewegte sich im Bereich weniger Prozent. Diese Art von Datennahme ist so erfolgreich, dass in einer Stunde etwa 100 000 DIS-Ereignisse gemessen wurden, was folgende Gesamtzahlen DIS-Ereignisse pro Targetgas ergab:

Targetgas	DIS-Ereignisse
Wasserstoff	$6.6 \times 10^6$
Deuterium	$1.9 \times 10^6$
Helium-4	$1.1 \times 10^6$
Neon	$3.9 \times 10^6$
Summe:	$13.5 \times 10^6$

Für einige Analysen beim HERMES-Experiment, wie zum Beispiel der Bestimmung der Polarisation des  $\Lambda/\bar{\Lambda}$ -Hyperons, ist es nicht nur wichtig, hohe Polarisationswerte zu haben, sondern auch die Helizität des Positronenstrahls regelmäßig zu ändern. Im Jahr 2000 wurde die Helizität einmal pro Monat gewechselt, und es gelang jeweils innerhalb einer HERA-Füllung, die Maschinenparameter so zu optimieren, dass wieder

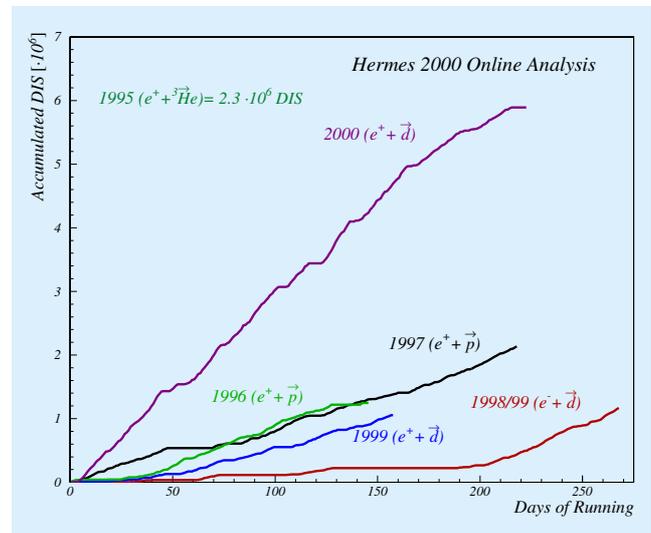


Abbildung 30: Tiefunelastische Streueignisse (DIS) pro Jahr und für die verschiedenen polarisierten Targets.

hohe Polarisationswerte erreicht wurden. Die Strahlpolarisation war über die gesamte Datennahme stabil und lag im Mittel bei 0.55 bis 0.60.

2000 war auch das erste Jahr, in dem HERMES nicht nur bei 27.5 GeV Strahlenergie Daten nahm, sondern auch bei der HERA-Injektionsenergie von 12 GeV. In drei Tagen Datennahme wurden insgesamt 3.8 Millionen DIS-Ereignisse an den vier verschiedenen unpolarisierten Targetgasen Wasserstoff, Deuterium, Stickstoff und Krypton gemessen. Diese Daten sind wichtig, um die Ursache für den vom HERMES-Experiment beobachteten Effekt der Abhängigkeit des Verhältnisses des longitudinalen zum transversalen tiefunelastischen Wirkungsquerschnittes  $R = \sigma_L/\sigma_T$  von der Kernmassenzahl zu verstehen (siehe auch Jahresbericht 1999).

## Das polarisierte HERMES-Target im Jahr 2000

Das HERMES-Target verwendet eine Speicherzelle, in die polarisierte Deuterium-Atome von einer Atomstrahlquelle (ABS) injiziert werden. Der Anteil von Deuterium-Atomen im Vergleich zu Molekülen in der Speicherzelle wird mit der Hilfe eines Massenspektrometers (TGA) aus einem Probestrahl aus dem Zentrum

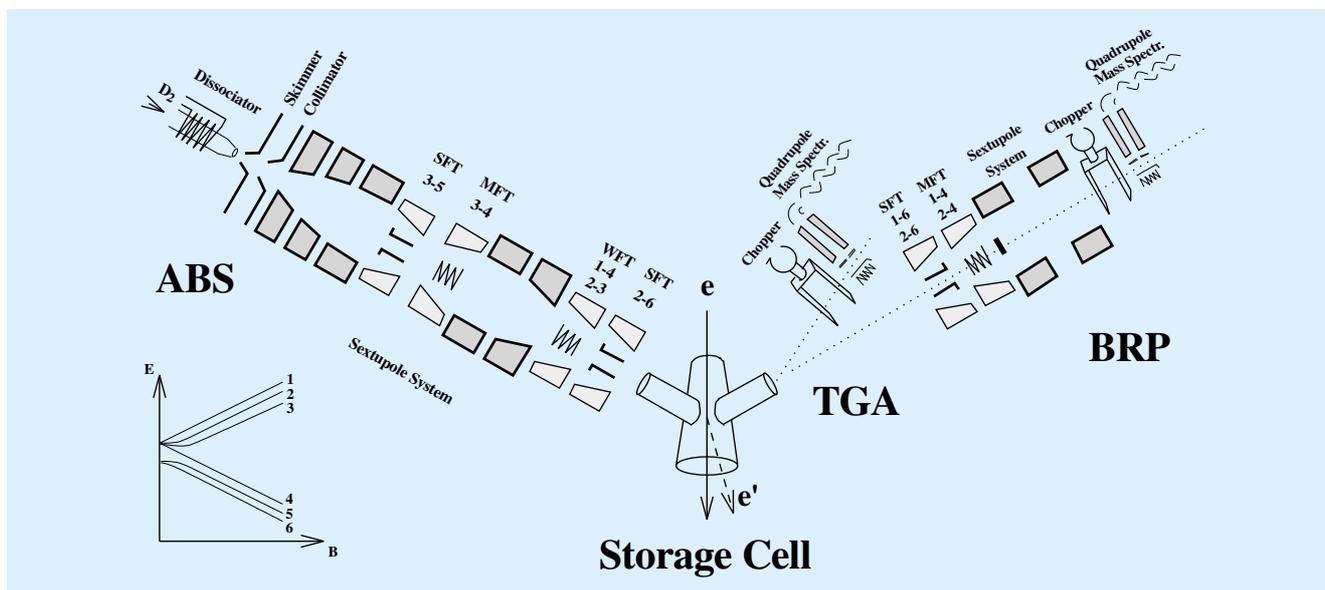


Abbildung 31: Schematische Darstellung des HERMES Targets.

der Zelle bestimmt. Aus dem gleichen Probestrahl wird auch die Polarisation der Atome mit einem Breit-Rabi Polarimeter (BRP) bestimmt. In den Jahren 1996 und 1997 wurde das Target mit Wasserstoff betrieben, seit 1998 wird Deuterium verwendet. Abbildung 31 zeigt schematisch den Aufbau des Targets.

Seit Ende 1999 wurden verschiedene technologische Verbesserungen vorgenommen, um die Targetdichte zu vergrößern. Der Querschnitt der Speicherzelle wurde von  $29 \times 9.8 \text{ mm}^2$  auf  $21 \times 9.8 \text{ mm}^2$  verkleinert und die Temperatur von 90 K auf 60 K verringert. Zusätzlich wurde der Radiofrequenz-Dissoziator durch einen Mikrowellen-Dissoziator ersetzt. Dank all dieser Verbesserungen lief das HERMES Deuteriumtarget in 2000 sehr stabil mit der doppelten Dichte des Wasserstofftargets in 1996/1997, was einer integrierten Flächendichte  $D_T = 2.1 \times 10^{14} \text{ Kerne/cm}^2$  entspricht. Während des normalen Betriebs wurde zwischen den beiden Vektor-Polarisationszuständen  $P_z^+$  und  $P_z^-$  alle 90 s geflippt. Sowohl der Anteil von Atomen zu Molekülen als auch die Polarisation der Atome zeigte in 2000 keine Abhängigkeit von der Zellentemperatur. Da sowohl die Rekombination wie die Depolarisation der Deuterium-Atome exponentiell von der Zellentemperatur abhängen, ist dies ein Zeichen, dass beide Effekte in der im Jahr 2000 verwendeten Speicherzelle stark unterdrückt waren. Diese Annahme wurde durch detaillierte Kali-

brierungsmessungen bestätigt, die die Separation des gemessenen molekularen Anteils in seine verschiedenen Bestandteile erlauben, wie Rekombination an der Zellenwand oder im Restgas. Das Ergebnis für den mittleren Anteil von Deuterium-Atomen in der Speicherzelle, welche nicht rekombinieren, ist  $\alpha_T^{\text{TGA}} = 0.996 \pm 0.014$  (syst.).

Ein Fit, basierend auf einem „Rate Equation Model“, an die gemessenen Besetzungszahlen der Hyperfeinzustände erlaubt die Bestimmung der injizierten Polarisation für D-Atome mit sehr kleiner Unsicherheit. Die injizierte Polarisation war typischerweise 0.905, mit einem mittleren Verlust an Polarisation von weniger als 0.2% durch Spinaustausch-Stöße und weniger als 0.5% durch Kollisionen mit der Zellenwand. Die Hypothese von vernachlässigbaren Depolarisationseffekten wird hiermit bestätigt.

Die perfekten Bedingungen für das Target im Jahr 2000 führen zu einer Abschätzung des totalen Fehlers der Target-Polarisation von weniger als 4%.

## Messungen mit dem polarisierten Target

Im Berichtsjahr konnten viele Analysen der Daten am polarisierten Wasserstoff der Jahre 1996/1997 weitgehend abgeschlossen und veröffentlicht werden. Der

Schwerpunkt lag allerdings auf der Analyse der polarisierten Deuterium-Daten aus den Jahren 1998 und 1999. Dabei konnte erstmals die vollständige Hadron-Identifikation durch den RICH-Detektor ausgenutzt werden. Außerdem waren Daten, basierend auf unpolarisierten Targets, Gegenstand zahlreicher Analysen. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser Ergebnisse vorgestellt.

### Die Spinstrukturfunktion $g_1$ von Proton und Deuteron

Die Ergebnisse der neuen Analysen der inklusiven Messungen für das Proton und das Deuteron sind in Abbildung 32 dargestellt. Ebenso wurden hier bereits veröffentlichte Daten vom CERN, SLAC und HERMES mit eingezeichnet.

Bemerkenswert sind insbesondere die weltweit neuen  $g_1^p$  Protondaten für den Bereich kleiner Bjorken- $x$ ,  $0.002 < x < 0.02$ , und kleiner Photon-Virtualitäten  $Q^2$ ,  $0.1 < Q^2 < 1.2 \text{ GeV}^2$ . Diese zeigen mit bisher bester Genauigkeit, dass die Spineffekte bei kleinen  $x$ -Werten noch signifikant und in etwa so groß sind wie im Bereich der Valenzquarks. Ein Vergleich der HERMES-Daten mit den bei wesentlich höheren Energien aufgezeichneten SMC-Daten deutet erstmalig auch für die Spinstrukturfunktion  $g_1^p$  auf eine Abhängigkeit von der  $Q^2$ -Skala bei kleinen  $x$ -Werten hin, in Analogie zu den bei H1 und ZEUS sehr gut vermessenen Skalenverletzungen der unpolarisierten Strukturfunktion  $F_2^p$  des Protons. Bisher ist es noch nicht möglich, Daten bei so kleinen Photon-Virtualitäten, das heißt bei relativ geringen Auflösungen, im Rahmen der Quantenchromodynamik zu interpretieren und damit die Kenntnis über die Quarkbeiträge zum Nukleonspin zu verbessern, jedoch kann man zu Recht davon ausgehen, dass sie neue Impulse für weitergehende Modelle liefern werden.

Für das Deuteron wurde etwa 1/7 der bisher aufgezeichneten Datenmenge analysiert. Bereits dieser erste Datensatz ist in seiner Qualität vergleichbar mit den Ergebnissen vom CERN und SLAC und befindet sich mit ihnen in guter Übereinstimmung. Im Gegensatz zum Proton ist das Deuteron noch nicht gut vermessen. Das HERMES-Experiment kann hier entscheidende Beiträge über den weiten kinematischen Bereich  $0.002 < x < 0.85$  liefern, sobald der volle Datensatz von etwa 8 Millionen Ereignissen für die Analyse aufbereitet ist.

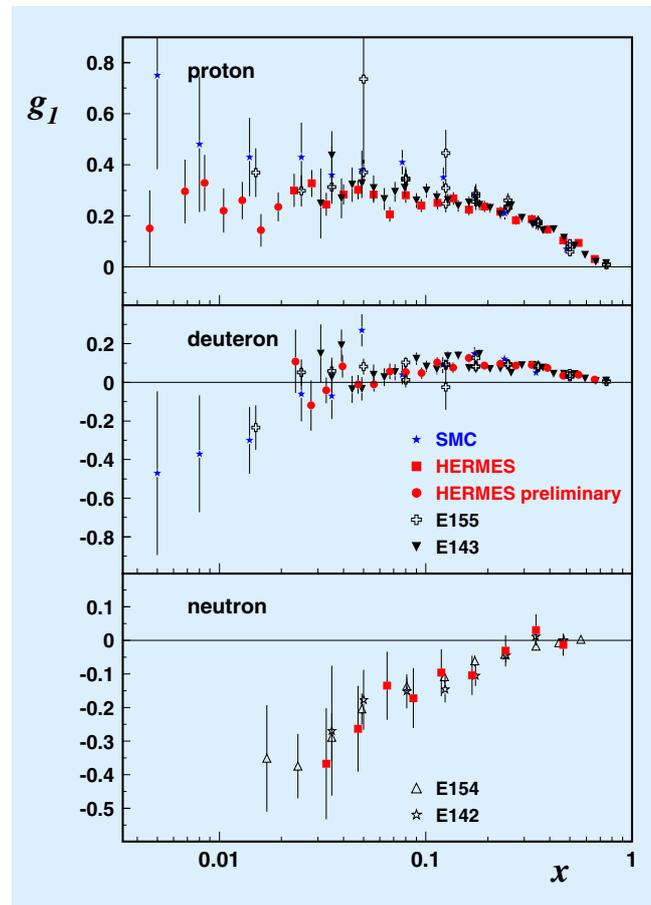


Abbildung 32: Spinstrukturfunktion  $g_1$  für Proton, Deuteron und Neutron in Abhängigkeit von der Bjorken-Skalenvariablen  $x$ . Die Abhängigkeit von der Photon-Virtualität  $Q^2$  ist nur schwach, was man aus der nur leichten Streuung der Datenpunkte der verschiedenen Experimente sehen kann. Die Fehlerbalken weisen die kombinierten statistischen und systematischen Unsicherheiten aus.

### Polarisierte Quark-Verteilungen

Die Messung der polarisierten Quarkdichten  $\Delta q(x)$  für up-, down- und strange-Quarks in Abhängigkeit von deren Impulsbruchteil  $x$  im Proton ist eine der zentralen Aufgaben des HERMES-Experiments. Die polarisierten Quarkdichten  $\Delta q(x) \equiv q^{\uparrow}(x) - q^{\downarrow}(x)$  geben dabei die Differenz an zwischen der Anzahl der Quarks, deren Spin parallel zum Spin des Protons ( $\uparrow\uparrow$ ) ausgerichtet ist, und der Anzahl der Quarks, deren Spin in die entgegengesetzte Richtung ( $\uparrow\downarrow$ ) orientiert ist.

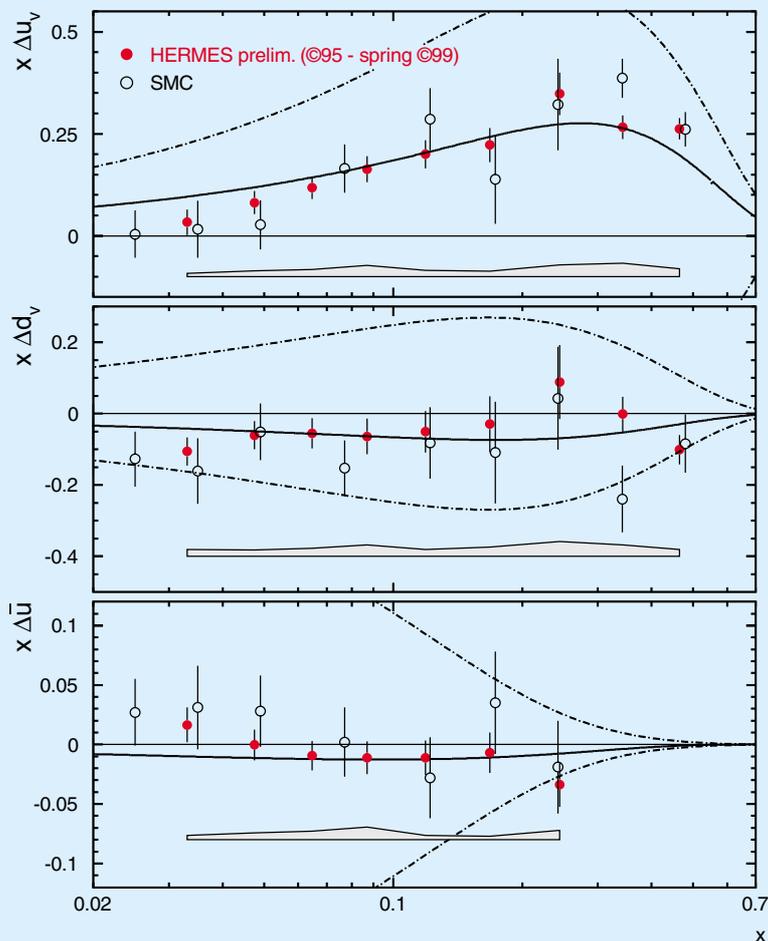


Abbildung 33: Neue HERMES-Resultate zu den polarisierten Valenzquark-Dichten  $x \cdot \Delta u_v(x)$  und  $x \cdot \Delta d_v(x)$ , sowie der polarisierten Seequarkdichte  $x \cdot \Delta \bar{u}(x)$ , gemessen bei einer „Auflösung“ von  $Q^2 = 2.5 (\text{GeV}/c)^2$ . Die HERMES-Datenpunkte bestätigen dabei mit einer wesentlich höheren Präzision frühere Ergebnisse des SMC-Experiments. Ebenfalls gute Übereinstimmung besteht mit einer theoretischen Parametrisierung der gemessenen Größen, welche als durchgezogene Linie in den Diagrammen eingezeichnet ist. Die strichpunktierten Linien begrenzen den theoretisch zulässigen Bereich für die Datenpunkte.

Ähnlich wie bei der Messung der polarisierten Strukturfunktion  $g_1(x)$  untersucht man dabei Asymmetrien im Wirkungsquerschnitt für die tiefunelastische Streuung der HERA-Strahlpositronen an einem Target aus polarisierten Deuterium-Kernen, deren Kernspin abwechselnd parallel und antiparallel zum Spin der Strahlpositronen ausgerichtet wird. Für die Bestimmung der polarisierten Quarkdichten wählt man gezielt semi-inklusive Streueignisse aus, bei denen im Spektro-

meter neben dem gestreuten Strahlpositron noch ein oder mehrere Hadronen in Koinzidenz nachgewiesen werden. Das Quark, welches bei dem tiefunelastischen Streuprozess getroffen wurde, wird aus dem Targetkern herausgeschlagen und bildet, da es als freies Quark nicht existieren kann, sofort neue Hadronen. Die Bestimmung des Hadrontyps erlaubt dann, eine Wahrscheinlichkeitsaussage zu treffen, welcher Sorte das getroffene Quark angehört. So entstehen beispielsweise

positive Pionen vorwiegend aus up-Quarks, wohingegen negative Kaonen bevorzugt bei der Streuung an strange-Quarks oder up-Antiquarks aus dem virtuellen Quarksee im Proton produziert werden.

Die Kombination semi-inklusive Asymmetrien, bei denen verschiedene Hadronen in Koinzidenz nachgewiesen werden, sowie die Kombination von Datensätzen, die an verschiedenen Targets gemessen wurden, ermöglicht es, die polarisierten Quarkdichten  $\Delta q(x)$  für verschiedene Quarksorten separat zu bestimmen. Abbildung 33 zeigt neue Resultate des HERMES-Experiments zu den polarisierten Valenzquarkdichten  $\Delta u_v(x)$  und  $\Delta d_v(x)$  sowie zur polarisierten Seequarkdichte  $\Delta \bar{u}(x)$ . Diese Ergebnisse basieren auf Daten, die von Sommer 1995 bis Frühjahr 1999 an Targets von polarisiertem Helium-3, Wasserstoff und Deuterium genommen wurden. Dabei wurden Hadronen lediglich nach ihrer Ladung, nicht aber nach ihrem Typ weiter unterschieden. Wie in Abbildung 33 ersichtlich, konnte die Präzision der Ergebnisse im Vergleich mit früheren Resultaten des SMC-Experiments am CERN deutlich verbessert werden. Es ist deutlich, dass die up-Valenzquarks zu einem hohen Grad positiv polarisiert sind, das heißt dass ihr Spin bevorzugt in Richtung des Protonspins ausgerichtet ist, wohingegen die down-Valenzquarks in geringerem Maße entgegengesetzt dem Protonspin orientiert sind. Für die Seequarks konnte bislang nur der über alle beteiligten Quarksorten gemittelte Beitrag ermittelt werden, da nicht zwischen den verschiedenen Hadron-Typen unterschieden werden konnte und somit nicht genügend unterschiedliche Asymmetrie-Datensätze zur Verfügung standen.

Zu Beginn des Jahres 1998 wurde bei HERMES ein so genannter RICH-Detektor („Ring Imaging Cherenkov Detector“) installiert. Mit diesem ist es seitdem möglich, zwischen geladenen Pionen, Kaonen und Protonen unter den gemessenen Hadronen zu unterscheiden. Die Kombination der unterschiedlichen semi-inklusive Asymmetrien für verschiedene Hadron-Typen erlaubt es, die polarisierte Seequarkdichte  $\Delta \bar{q}(x)$  in die Beiträge der einzelnen Quarksorten,  $\Delta \bar{u}(x)$ ,  $\Delta \bar{d}(x)$  sowie  $\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x)$  aufzuspalten.

Insbesondere der Beitrag der polarisierten strange-Quarkdichte,  $\Delta s(x) + \Delta \bar{s}(x)$ , ist dabei von großem theoretischen Interesse. Ein von Null verschiedener Beitrag der Polarisation der strange-Quarks würde die in

den vergangenen Jahren experimentell beobachtete Verletzung der Ellis-Jaffe-Summenregel erklären. Semi-inklusive Asymmetrien, bei denen zusammen mit dem gestreuten Strahlpositron ein negatives Kaon im Detektor nachgewiesen wird, eignen sich in besonderem Maße zur Bestimmung der Polarisation der strange-Quarks. Dies rührt daher, dass negative Kaonen aus jeweils einem strange-Quark und einem up-Antiquark, also Bestandteilen des virtuellen Quarksees im Proton, bestehen und daher besonders sensitiv auf diese Größen sind. In Abbildung 34 sind die weltweit ersten, vorläufigen Daten des HERMES-Experiments zu semi-inklusive Asymmetrien mit geladenen Kaonen gezeigt. Dabei fällt auf, dass in einem weiten Bereich für Werte von  $x < 0.1$ , in dem die Streuung an Quarks aus dem virtuellen See dominiert, die Asymmetrie für negative Kaonen Null oder sogar leicht negativ ist.

Die in Abbildung 34 gezeigten ersten Resultate basieren auf der Analyse von ungefähr 2 Millionen tiefunelastischen Streueignissen, bei denen gut 31 500 positive und 14 500 negative Kaonen in Koinzidenz nachgewiesen wurden. Dies entspricht etwa

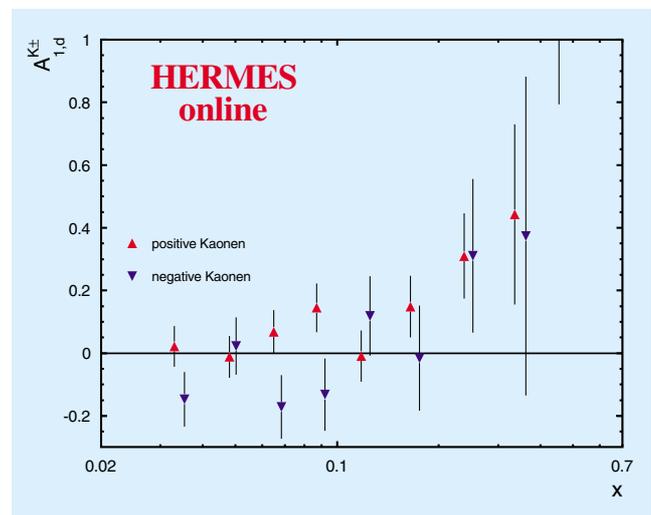


Abbildung 34: Resultate von HERMES zu semi-inklusive Kaon-Asymmetrien, bei denen in Koinzidenz mit dem gestreuten Strahlpositron ein geladenes Kaon im Detektor nachgewiesen wird. Diese Ergebnisse basieren auf einem Viertel des gesamten Datensatzes für die Streuung an einem polarisiertem Deuteriumtarget, den HERMES in den Jahren 1998 bis 2000 aufgezeichnet hat.

einem Viertel des Gesamtdatensatzes, der in den Jahren 1998 bis 2000 mit einem polarisierten Deuteriumtarget aufgezeichnet wurde. Die statistischen Unsicherheiten der gezeigten Asymmetrien werden sich nach erfolgter Auswertung des kompletten Datensatzes halbieren, und damit werden signifikante Aussagen über den Beitrag der strange-Quarks sowie der übrigen Quarksorten zum Gesamtspin des Protons möglich.

### Exklusive Reaktionen

In den letzten Jahren ist ein wachsendes theoretisches Interesse an den noch unbekanntenen so genannten „Skewed Parton Distributions“ (SPD) des Nukleons entstanden. Diese sind eine Verallgemeinerung der Parton-Verteilungen, welche in inklusiven tiefunelastischen Streuexperimenten gemessen werden. Sie geben zusätzlich zur Beschreibung der Struktur des Nukleons noch Informationen über die Korrelationen unter den Partonen und möglicherweise über deren Bahndrehimpulse. Im Rahmen der SPD-Beschreibung sind die Quantenzahlen des exklusiv produzierten Teilchens mit den verschiedenen Skewed Parton-Verteilungen verbunden. So spielen bei der exklusiven Produktion von Vektormesonen die unpolarisierten SPDs eine Rolle, bei der Produktion von pseudoskalaren Mesonen die polarisierten SPDs, während zur exklusiven Produktion von reellen Photonen beide Arten von Skewed Parton-Verteilungen beitragen. Gerade bei diesem Prozess, der tief-virtuellen Compton-Streuung („Deeply Virtual Compton Scattering“ DVCS), wird erwartet, dass der Beitrag des Bahndrehimpulses der Partonen zum Gesamtspin des Nukleons untersucht werden kann. Erste Ergebnisse zu diesem Prozess liegen vom HERMES-Experiment seit diesem Jahr vor.

Weiterhin wurde beim HERMES-Experiment die exklusive Leptoproduktion des  $\rho$ -Mesons gemessen. Der longitudinale Teil des Wirkungsquerschnitts wurde über die Winkelverteilung des  $\rho$ -Zerfalls bestimmt. Sie befindet sich in guter Übereinstimmung mit unpolarisierten SPDs, die auf theoretischen Berechnungen basieren. In der durch das HERMES-Experiment abgedeckten kinematischen Region sind große Korrekturen zu den führenden Termen („leading order terms“) notwendig. Es wird vermutet, dass diese Korrekturen in der exklusiven Produktion von Pionen und Photonen wesentlich kleiner sind.

In jüngerer Zeit wurde bei HERMES eine vorläufige Messung von exklusiver  $\pi^+$ -Produktion an einem Wasserstofftarget bei  $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$  ausgeführt. In dieser Messung wurde der exklusive Kanal ausgewählt, indem ein  $\pi^+$ -Meson nachgewiesen wurde. Als Abschätzung für den nicht-exklusiven Hintergrund wurde die Verteilung der  $\pi^-$ -Mesonen in der Missing Mass-Region des Rückstoß-Nukleons abgezogen. Die kinematische Verteilung der Ereignisse (in  $Q^2$ ,  $x$ ,  $-t$ ) stimmt mit Monte Carlo-Simulationen überein, die auf einem Generator basieren, der alle für die exklusive Pion-Produktion wichtigen Beiträge, wie zum Beispiel den Pion-Pol, enthält (Abb. 35). Die Effizienzen und Akzeptanzen für diesen Prozess werden sorgfältig untersucht, um den absoluten Wirkungsquerschnitt zu extrahieren. Zusätzlich wurden die azimutalen  $\sin \phi$ -Momente der Asymmetrie bei longitudinaler Targetpolarisation („Single Spin Asymmetry“ SSA) gemessen. Dabei ist  $\phi$  der azimutale Winkel zwischen der Streuebene des Leptons und der Ebene, die durch das Pion und das virtuelle Photon aufgespannt wird. Im exklusiven Limit  $z \rightarrow 1$  tritt eine dramatische Erhöhung mit Vorzeichenwechsel bei der  $\pi^+$ -SSA auf, die in der Fragmentations-

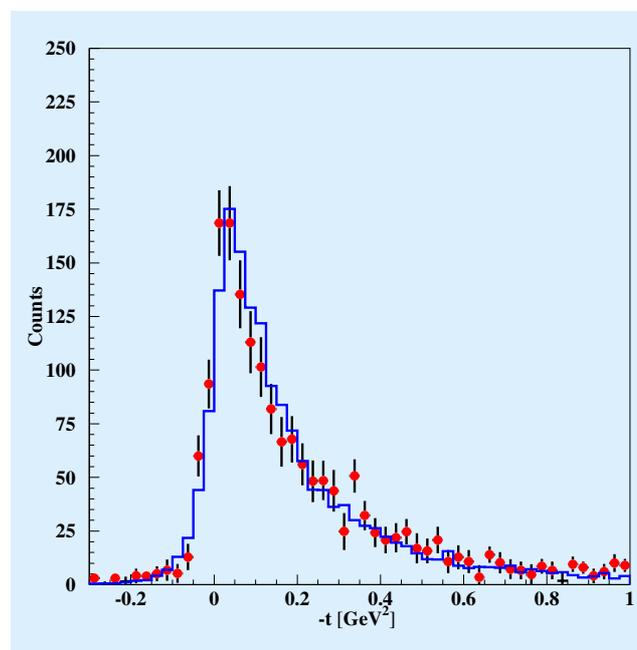


Abbildung 35: Verteilung des Viererimpulsübertragsquadrats  $t$  zum Nukleon in der Reaktion  $e + p \rightarrow e' + \pi^+ + n$  aus Monte Carlo-Simulationen (Histogramm) im Vergleich mit Daten (Punkte).

region ( $z < 0.7$ ) nur etwa 2% beträgt. Im Falle der  $\pi^0$ -SSA wurde im exklusiven Limit zwar kein Vorzeichenwechsel, jedoch ein starkes Anwachsen verzeichnet. Des Weiteren wurde beim HERMES-Experiment auch die Elektroproduktion reeller Photonen bei kleinen  $t$ -Werten (DVCS) untersucht. Dieser Prozess wird von einem starken Untergrund, dem Bethe-Heitler Prozess, dominiert. Die Interferenz zwischen DVCS und dem Bethe-Heitler Prozess wurde dazu benutzt, die erste Messung der SSA (in Bezug auf die Strahlpolarisation) in der azimuthalen ( $\phi$ ) Verteilung der exklusiven Leptonproduktion reeller Photonen auszuführen. Im exklusiven Limit wurde ein großer Wert der SSA beobachtet, im Gegensatz zur Fragmentationsregion. Die  $\sin\phi$ - und  $\sin 2\phi$ -Momente dieser Messung geben Aufschluss über den imaginären Teil der Helizitäts-Amplituden im DVCS-Prozess. Diese bieten möglicherweise Zugang zum Bahndrehimpuls der Partonen.

## Messungen an unpolarisierten Targets

### Hadron-Produktion durch tiefunelastische Positronstreuung an schweren Kernen

Der Kenntnisstand über die Zeit, die zur Erzeugung eines Pions oder Protons in physikalischen Reaktionen bei hohen Energien nötig ist, ist sehr beschränkt. Die Bildungsdauer („formation time“) der Hadronen offenbart grundlegend neues Wissen über zusammengesetzte Systeme aus Quarks und Gluonen. Darüber hinaus sind quantitative Ergebnisse über die Hadron-Bildungsdauer zur Interpretation von Schwerionen-Kollisionen notwendig, die die Suche nach einem neuen Materiezustand, dem Quark-Gluon Plasma, zum Ziel haben. Es ist daher von hohem Interesse, experimentelle Informationen über diese Bildungsdauer und deren Abhängigkeit von der Art des erzeugten Teilchens zu bekommen.

Eine einfache Abschätzung der Bildungsdauer eines Hadrons ist im Rahmen des „Color-String“-Modells möglich. Dabei wird angenommen, dass die Zeit zur Bildung eines Hadrons ungefähr der Zeit entspricht, einen String mit einer Federkonstante von  $\kappa \approx 1 \text{ GeV/fm}$  zu spannen. Die Idee hinter diesem Modell ist, dass das Potential der starken Wechselwirkung zwischen zwei

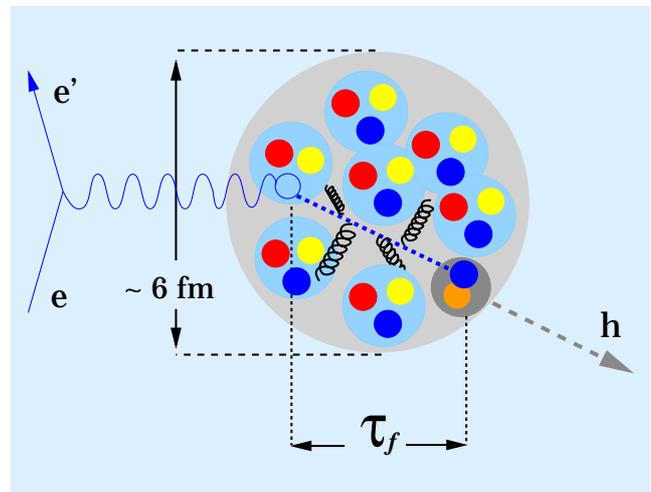


Abbildung 36: Schematische Abbildung der Hadronerzeugung in Positronstreuung. Ein Quark in einem Nucleon des  $^{14}\text{N}$ -Atomkerns wird getroffen, und es bilden sich Hadronen. Wegen der sekundären Wechselwirkung innerhalb des Atomkerns reduziert sich die Zahl der beobachtbaren Hadronen.

Quarks mit dem Abstand zunimmt, ähnlich einer normalen Feder. In diesem Rahmen lässt sich die Bildungslänge zu  $l_f \propto E/\kappa$  abschätzen, wobei  $E$  die Energie bezeichnet, die beiden Quarks zur Verfügung steht. Bei genügend hohen Energien entspricht diese Energie  $E$  ungefähr der vom einfallenden Strahl an das Target übertragenen Energie  $\nu$ . Typische Werte für  $\nu$  (oder  $E$ ) erreichen einige GeV, dementsprechend eine Bildungslänge von einigen fm. Da sich die Quarks innerhalb eines Protons mit einem beträchtlichen Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit  $c$  bewegen, ist die Bildungsdauer in der Größenordnung von  $10^{-23}$  Sekunden.

Experimentellen Aufschluss über die Bildungsdauer erhält man, wenn man den Erzeugungsprozess in einen Atomkern einbettet, wie in Abbildung 36 dargestellt. Das erzeugte Hadron kann mit den umgebenden Kernbausteinen wechselwirken. Daher wird die Anzahl der im Experiment beobachteten Hadronen bei Streuung an einem Quark in einem schweren Kern kleiner als in einem Proton sein. Diese Verminderung wird umso stärker sein, je früher das Hadron gebildet wird. Daher hat das Verhältnis der Anzahl produzierter Hadronen an schweren Kernen  $A$  zu der an Deuterium  $D$  die größte Empfindlichkeit für die Bildungsdauer  $\tau_f^h$ .

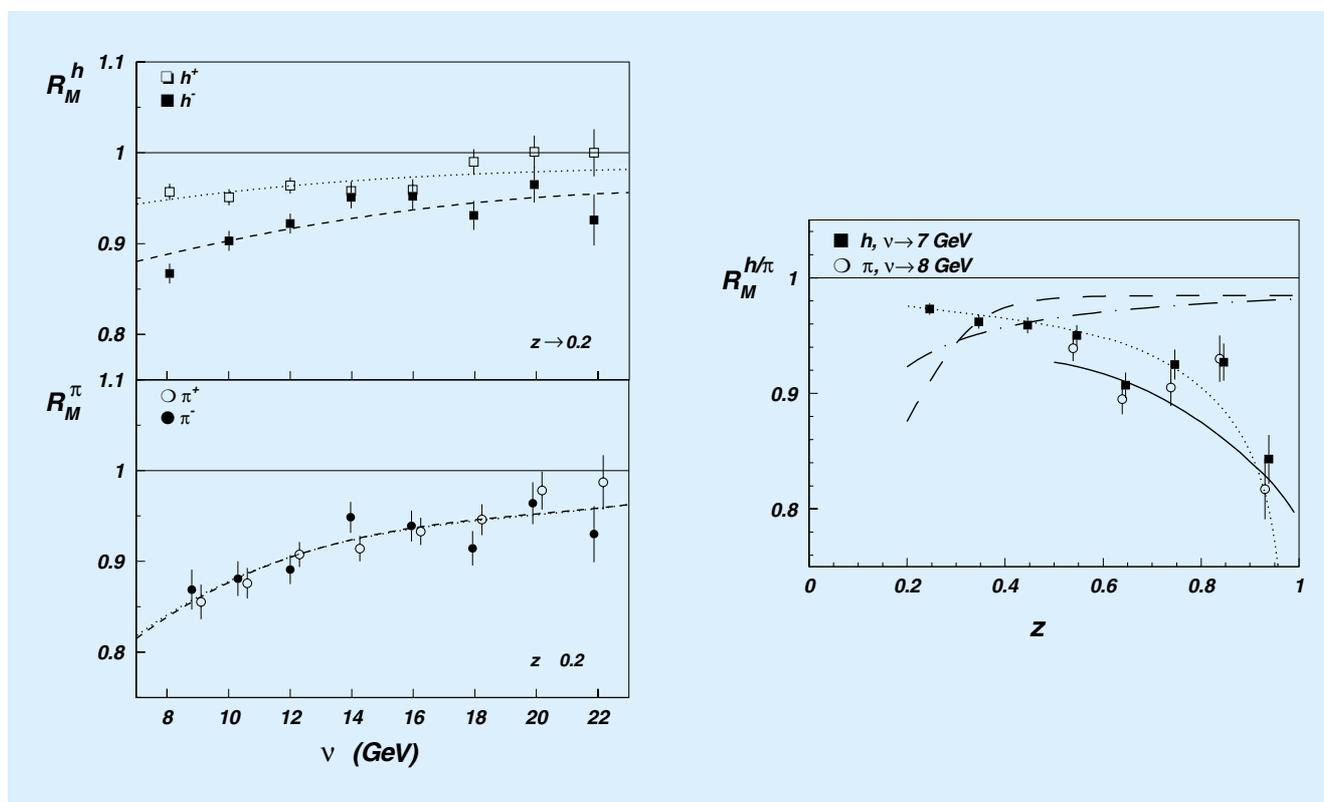


Abbildung 37: Das Verhältnis der Anzahl der an  $^{14}\text{N}$  und an  $\text{D}$  produzierten Hadronen, jeweils normiert auf die Anzahl tiefunelastischer Streueignisse. Auf der linken Seite ist dieses Verhältnis als Funktion des Energieübertrags  $\nu$  für positiv und negativ geladene Hadronen (oben) und positiv und negativ geladene Pionen (unten) gezeigt. Die rechte Figur zeigt das gleiche Verhältnis als Funktion des Energiebruchteils  $z$  des Hadrons.

Um den Einfluss der Kernumgebung auf den Erzeugungsprozess von Hadronen zu optimieren, sollte der Energieübertrag  $\nu$  nicht viel größer als 30 GeV sein. Ansonsten wird die Bildungslänge sehr viel größer als der Kerndurchmesser (etwa 6 fm für  $^{14}\text{N}$ ), und der Einfluss der Kernumgebung wird vernachlässigbar klein. Aus dieser Annahme folgt, dass die Wechselwirkung zwischen dem getroffenen Quark und der Umgebung sehr klein ist, wofür es in der Tat experimentelle Hinweise gibt. In dieser Hinsicht ist der vom HERMES-Experiment abgedeckte Energiebereich –  $\nu$  reicht von 7 bis 23 GeV – ideal.

Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abbildung 37 dargestellt. Die rechte Figur zeigt das Verhältnis der Anzahl der an  $^{14}\text{N}$  und an  $\text{D}$  produzierten

Hadronen, jeweils normiert auf die Anzahl tiefunelastischer Streueignisse, als Funktion des Bruchteils  $z$  der Energie des erzeugten Hadrons am Energieübertrag  $\nu$ . Die Daten zeigen einen überraschenden Abfall mit  $z$ . Qualitativ bedeutet dies, dass schnelle Hadronen eine kurze Bildungsdauer haben und deshalb im Verhältnis stark abgeschwächt werden. Lediglich das so genannte Gluon-Bremsstrahlungs-Modell (durchgezogene Linie) und eine Parametrisierung der Daten unter der Annahme  $\tau_f^h = c_h(1-z)\nu$  beschreiben die  $z$ -Abhängigkeit der Daten zufriedenstellend. Ältere Berechnungen unter der Annahme, dass  $\tau_f^h$  proportional zu  $z$  ist, befinden sich im Widerspruch zu den Daten.

Die linke Figur in Abbildung 37 zeigt das Verhältnis der Anzahl der produzierten Hadronen an  $^{14}\text{N}$  und

an  $D$  als Funktion des Energieübertrags  $\nu$  für positiv und negativ geladene Hadronen (oberer Teil) sowie positiv und negativ geladene Pionen (unterer Teil). Die Daten lassen sich durch die oben angegebene Beschreibung  $\tau_f^{\pm} \propto (1-z)\nu$  parametrisieren. Aus dieser Beschreibung lässt sich ableiten, dass es, abhängig von  $z$  und  $\nu$ , zwischen  $0.2$  und  $8 \times 10^{-23}$  Sekunden dauert, ein positiv oder negativ geladenes Pion zu bilden. Im oberen linken Bild in Abbildung 37 wird gezeigt, dass positiv geladene Hadronen sehr viel weniger abgeschwächt werden als negativ geladene. Weniger Abschwächung bedeutet weniger Streuung des gebildeten Hadrons und somit, dass positive Hadronen – im Durchschnitt – später gebildet werden. Da die Bildungsdauer für positiv und negativ geladene Pionen ähnlich ist, muss dieses unerwartete Ergebnis dem Beitrag von Protonen unter den positiv geladenen Hadronen zugeschrieben werden, die vermutlich eine sehr viel größere Bildungsdauer haben. Diese Annahme kann bestätigt oder widerlegt werden, wenn die im Jahr 1999 unter Verwendung des RICH-Detektors genommenen Kryptonaten analysiert sind, wobei dann zwischen Pionen, Kaonen und Protonen unterschieden werden kann.

### Vektormeson Erzeugung

Die vergangenen Jahre haben interessante Ergebnisse auf dem Gebiet der Elektroproduktion von  $\rho$ ,  $\omega$  und  $\phi$  Mesonen hervorgebracht. Die Kinematik dieser Reaktionen am HERMES-Experiment weist unseren Daten eine wichtige Rolle zu. Niedrigenergie-Experimente haben gezeigt, dass der Wirkungsquerschnitt stark mit der Energie abnimmt. Auf der anderen Seite zeigen Hochenergie-Experimente, wie die Kollisionsexperimente bei HERA, in ihrem viel höheren Energiebereich einen fast flachen bzw. einen leicht steigenden Wirkungsquerschnitt. Bei HERA „Collider“-Energien überwiegt die Produktion von Vektormesonen durch einen 2-Gluonen-Austauschmechanismus. Neuere Berechnungen, die auf dem Skewed Parton Distribution Formalismus basieren, deuten an, dass im kinematischen Bereich des HERMES-Experimentes der Quark-Austauschmechanismus dominieren sollte, aber auch ein Beitrag vom 2-Gluonen-Austausch erwartet wird. HERMES ist das einzige Experiment im Energiebereich oberhalb der Resonanzproduktion und unterhalb der Energien, bei denen der 2-Gluonen-Aus-

tausch dominiert. Daher kann es Daten in dem Bereich liefern, in dem der neue SPD-Formalismus getestet werden kann.

Im HERMES-Experiment misst man das gestreute Lepton und die Zerfallsprodukte der Vektormesonen: zwei entgegengesetzt geladene Pionen beim Zerfall des  $\rho^0$ , zwei entgegengesetzt geladene Kaonen beim Zerfall des  $\phi$  bzw. zwei entgegengesetzt geladene Pionen und die zwei Photonen eines  $\pi^0$  beim Zerfall des  $\omega$ . Für die Bestimmung der Wirkungsquerschnitte werden Daten verwendet, die mit einem unpolarisierten Gastarget genommen wurden. Die Akzeptanz für die Vektormeson-Produktion ist auf den Energiebereich von 4 bis 6 GeV beschränkt, wobei  $Q^2$  zwischen  $0.7$  und  $5.0 \text{ GeV}^2$  liegt.

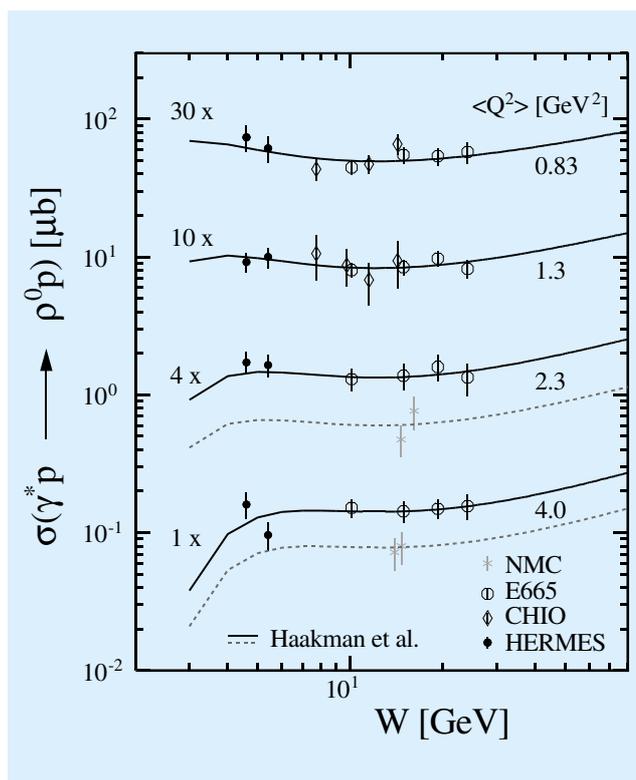


Abbildung 38: Der vom HERMES-Experiment gemessene Elektroproduktions-Wirkungsquerschnitt für  $\rho^0$ -Mesonen (volle Punkte) im Vergleich mit bereits bestehenden Daten und einer theoretischen Rechnung von Haakman et al. Der Unterschied in den NMC- und HERMES-, E665- und CHIO-Daten liegt an einem Problem in der Normierung, das durch die neuen HERMES-Daten allein leider nicht gelöst werden kann.

Infolge des endlichen Auflösungsvermögens des Detektors bleibt unter dem eigentlichen Spektrum der exklusiven Vektormeson-Produktion ein Untergrund, welcher vorwiegend von Hadronen aus Fragmentationsprozessen der tiefunelastischen Streuung herrührt.

Dieser Untergrund kann mit Hilfe von Monte Carlo-Simulationen abgeschätzt werden, welcher, geeignet normiert, von der eigentlichen Massenverteilung abgezogen werden kann.

Die Akzeptanzkorrektur für das HERMES-Spektrometer wurde auch durch eine Monte Carlo Simulation berechnet. Am Ende wurden Korrekturen für den Untergrund von doppelt-dissoziativen Prozessen und für QED-Strahlungseffekte durchgeführt.

Die Daten für die Vektormeson-Produktion wurden mit Hilfe des inklusiven Wirkungsquerschnittes, den man aus dem gleichen Datensatz extrahiert, normalisiert. Die erforderlichen Normierungsfaktoren erhält man durch Vergleich der Daten für die tiefunelastische Streuung am HERMES-Experiment mit denen von anderen Experimenten, wobei die passenden  $Q^2$ - und  $x$ -Bereiche gewählt werden müssen.

Der resultierende Wirkungsquerschnitt für die Elektroproduktion von  $\rho^0$  Mesonen wird in Abbildung 38 mit bereits bestehenden Daten verglichen. Die Kurven zeigen die Rechnungen von Haakman et al., welche die Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts mit der Protonstrukturfunktion  $F_2^p(x, Q^2)$  ins Verhältnis setzt. Dieses Modell beschreibt alle Daten für  $W > 4$  GeV gut.

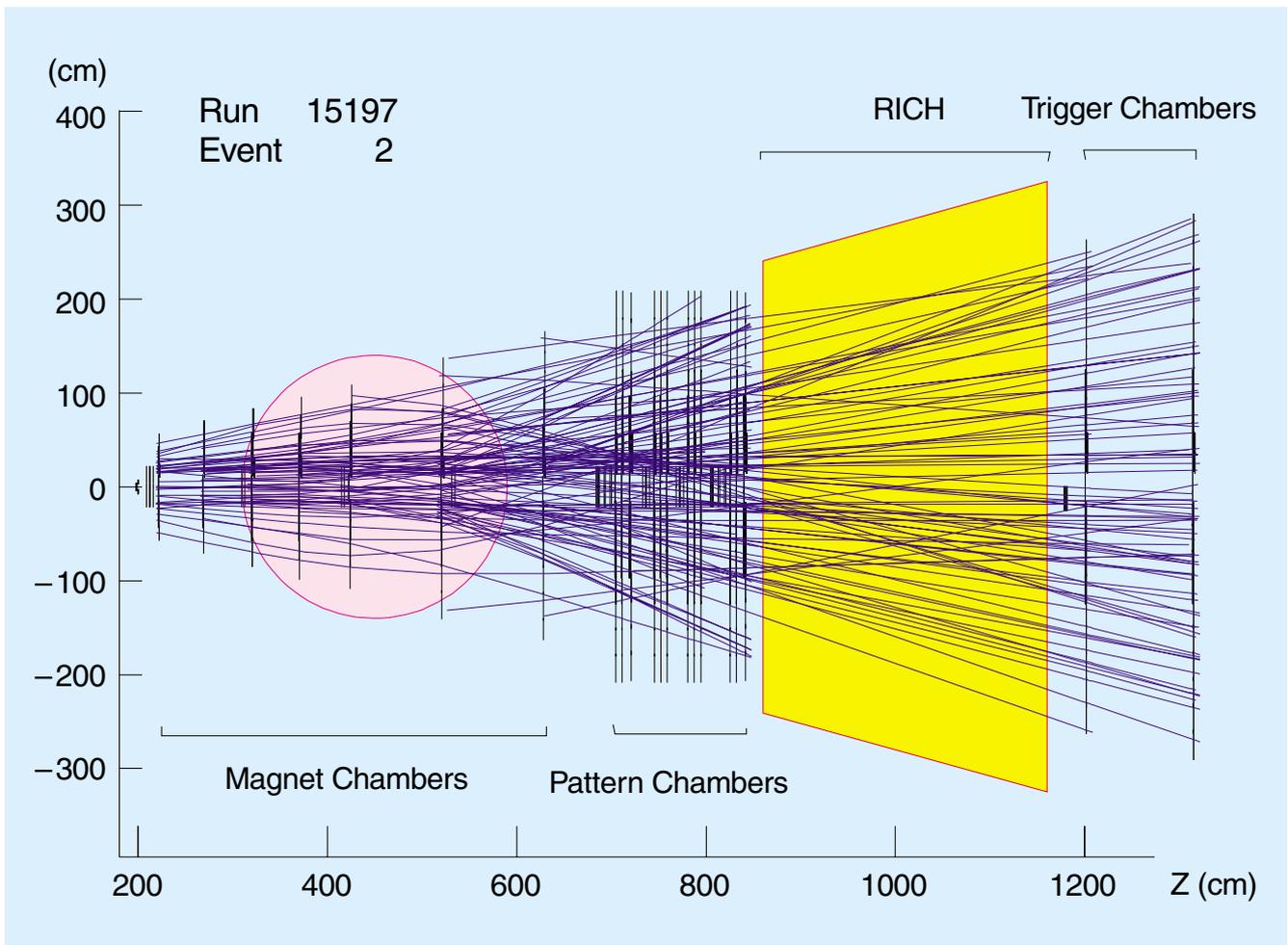


Abbildung 39: Rekonstruiertes Ereignis mit 126 Teilchenspuren im äußeren Spurkammer-system.

# 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, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, Northwestern Univ. Evanston, DESY Hamburg, Univ. Hamburg, MPI Kernphys. Heidelberg, Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Univ. Ljubljana, UC Los Angeles, LIP and Univ. Lissabon, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, MEPHI Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, PNPI St. Petersburg, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

**Sprecher:** A. Schwarz, DESY (bis Oktober 2000), M. Medinnis, DESY (ab Oktober 2000)

**Ziel des Experiments HERA-B ist die Untersuchung von Aspekten der Physik von Bottom- und Charm-Quarks. Zu diesem Zweck hat die HERA-B Kollaboration ein Vorwärtsspektrometer aufgebaut, das die Teilchen, die in Wechselwirkungen des Halo des HERA-Protonenstrahls mit dem Drahttarget von HERA-B produziert werden, genau vermisst und identifiziert.**

Unter den vielen Wechselwirkungen sind nur sehr wenige, etwa eine unter einer Million, die zur Erzeugung von Bottom-Hadronen führen. Um diese in ausreichender Zahl zu erzeugen, müssen demnach sehr viele Wechselwirkungen in den Targetdrähten stattfinden; das Experiment ist dafür konzipiert, Wechselwirkungsraten von bis zu 40 Millionen pro Sekunde zu verarbeiten.

Die Anforderungen an das Spektrometer sind daher außerordentlich: alle Detektoren, speziell die Detektoren zur Spurrekonstruktion, müssen eine sehr hohe Strahlenbelastung aushalten und bei Teilchenflüssen von mehr als  $10^6$  Teilchen pro Sekunde und Quadratzentimeter eine Spurrekonstruktion ermöglichen.

Das Trigger- und Datennahmesystem muss eine extrem hohe Selektivität und Effizienz aufweisen, um aus der enormen Anzahl von Untergrundreaktionen die wenigen interessanten Reaktionen mit charakteristischen Zerfällen der B-Mesonen herauszufiltern.

An den Detektor und das Datennahmesystem werden hierbei Anforderungen gestellt, die denen zukünftiger Experimente bei LHC (Large Hadron Collider, CERN, ab etwa 2006) völlig äquivalent sind. HERA-B spielt hier eine wichtige Vorreiterrolle, und die hier gemachten Erfahrungen haben die Planung der Experimente am LHC bereits nachhaltig beeinflusst.

Im Jahr 2000 wurde das HERA-B Spektrometer fertig gestellt, im Frühjahr wurden die letzten Detektoren des inneren Spurrkammersystems sowie die letzten Komponenten der ersten Triggerstufe installiert. In der Zeit bis zum Beginn der HERA Betriebspause im September wurden alle Komponenten in Betrieb genommen und Daten mit unterschiedlichen Triggerbedingungen aufgezeichnet.

Diese Daten, deren Auswertung noch nicht abgeschlossen ist, dienen im Wesentlichen zur Kalibration des Detektors und zur Entwicklung von Auswerte-Algorithmen. Das Ziel, selektiv auf B-Mesonen zu triggern und diese in ausreichender Zahl zu beobachten, konnte noch nicht erreicht werden.

Die Betriebspause von HERA vom September 2000 bis zum Juli 2001 wird von der HERA-B Kollaboration dazu genutzt, das Spektrometer, basierend auf den im Jahr 2000 gemachten Erfahrungen, zu verbessern und während des Betriebs aufgetretene Schäden zu reparieren.

## Der Detektor HERA-B

Der Detektor HERA-B setzt sich aus vier verschiedenen mechanischen Grundeinheiten zusammen:

**Vertexplattform:** hier befindet sich der Vakuumtank für Vertexdetektor und Target.

**Magnetplattform:** zwischen den Polschuhen des Dipolmagneten sind die inneren Spurkammern (Granularität 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 Eisenabsorbieren. Auch hier werden in der Nähe des Strahlrohres Detektoren mit kleiner Granularität (Myon-Pixelkammern) eingesetzt.

## Das HERA-B Target

Die Aufgabe des HERA-B Targets ist es, bis zu  $4 \cdot 10^7$  unelastische Wechselwirkungen mit dem Halo des Protonenstrahls von HERA zu erzeugen. Das Target besteht aus acht dünnen Drahtbändern, die in zwei um 40 mm entlang der Strahlachse separierten Stationen um den HERA-Protonenstrahl angeordnet sind und zur Erzeugung der Wechselwirkungen in den Randbereich des Strahles (Halo) gefahren werden können. Die typischen Abmessungen der Bänder betragen  $500 \mu\text{m}$  in Strahl- und  $50 \mu\text{m}$  in Radialrichtung. Neben fünf Targetbändern aus Titan ist je ein Target aus Kohlenstoff, Aluminium und Wolfram installiert; dies erlaubt eine genaue Untersuchung der Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts vom Material des Targets. Der Aufbau wird im Vakuum des HERA-B Vertex tanks betrieben, wenige Zentimeter vor der ersten Lage von Siliziumstreifen-zählern des Vertexdetektors.

Um die Wechselwirkungsrate konstant zu halten, kann jeder Targetdraht von einer Präzisionsmechanik in radialer Richtung bewegt werden. Typische Schrittweiten liegen im Bereich weniger zehntel Mikrometer, wobei etwa 10 Regelzyklen pro Sekunde ausgeführt werden.

Seit 1998 wird das Target kontinuierlich betrieben. Neben der Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebs liegen die Hauptaufgaben in der weiteren Verbesserung der Ratenqualität, die durch den mechanischen Aufbau, die Targetsteuerung, die Strahlqualität und die Betriebsparameter des Speicherrings beeinflusst wird. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Optimierung des Targetbetriebes hinsichtlich eines effizienten Betriebs aller vier HERA-Experimente.

Abbildung 40 zeigt die mit dem Target erreichte Luminosität in den Jahren 1999 und 2000. Allein im Jahr 2000 betrug sie etwa  $13\,000 \text{ MHz}\cdot\text{h}$ , entsprechend  $4.7 \cdot 10^{13}$  unelastischen Wechselwirkungen. Das Target war 94% der HERA-Luminositätszeit in Betrieb; dabei ist der Effizienzverlust von 6% dominiert durch die koordinierte Inbetriebnahme der vier HERA-Experimente zu Beginn jedes Luminositätsbetriebs. Effizienzverluste durch technische Probleme des Targets liegen in der Größenordnung von 1%. Damit hat sich das Target als äußerst stabiles und zuverlässiges System erwiesen.

Obwohl das Target für Wechselwirkungen von 40 MHz ausgelegt wurde und den gleichzeitigen Betrieb aller acht Drähte erlaubt, wurde es den überwiegenden Teil des Jahres 2000 mit nur einem Draht bei moderaten Raten von 4–5 MHz betrieben. Die Gründe hierfür liegen in

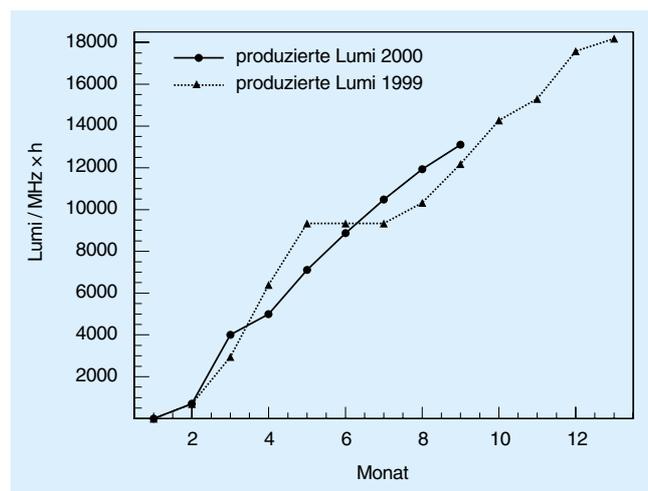


Abbildung 40: Die mit dem HERA-B Target erreichte Luminosität in den Jahren 1999 und 2000. In der Runperiode 2000 wurden etwa  $4.7 \cdot 10^{13}$  unelastische Wechselwirkungen erzeugt.

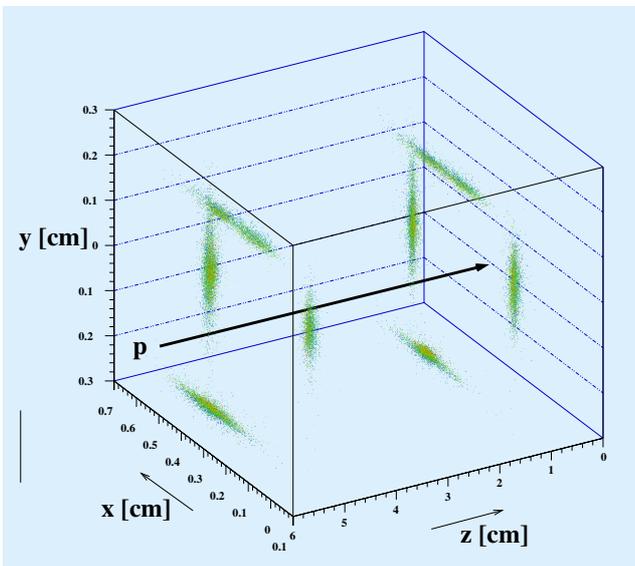


Abbildung 41: Mit Hilfe des Vertexdetektors rekonstruierte Vertices auf den Target-Drähten. Alle acht Targets wurden gleichzeitig betrieben. Der Protonenstrahl verläuft von links nach rechts.

der Inbetriebnahme des HERA-B Detektors. Dennoch sind Studien bei hohen Wechselwirkungsrate durchgeführt worden, welche die Eignung des Targets für den Hochratenbetrieb dokumentieren.

Mehrdrahtbetrieb fand in 27% der Betriebszeit des Targets statt, die Hälfte davon entfällt auf Zweidraht-Konfigurationen. Auch der Betrieb aller acht Drähte wurde mit Erfolg getestet. Abbildung 41 zeigt die mit Hilfe des HERA-B Vertexdetektors rekonstruierten Vertices auf den Target-Drähten. Um die Wechselwirkungsrate möglichst gleichmäßig auf die einzelnen Drähte zu verteilen, wird für jedes Target die zur Rate proportionale Zahl der  $\delta$ -Elektronen, welche im Drahtmaterial produziert werden, gemessen. Im Jahr 2000 konnte die Sensitivität dieses Messaufbaus um eine Größenordnung gesteigert werden; dies bedeutet eine weitere Verbesserung der Ratengleichverteilung gerade auch bei moderaten Wechselwirkungsrate.

Um einen effizienten Detektorbetrieb zu ermöglichen, ist eine möglichst konstante Wechselwirkungsrate erwünscht. Hieraus ergeben sich hohe Anforderungen nicht nur an die Targetsteuerung, sondern auch an die Positioniergenauigkeit der Targetmechanik. Hysterese-

effekte im Fahrverhalten sowie Spindelspiel im Antrieb der Mechanik, hervorgerufen durch Schwachstellen im mechanischen Aufbau sowie Alterung des Materials, konnten durch ein verbessertes Design der Targetmechanik drastisch reduziert werden. Damit ist das Fahren der Targets auf dem gesamten Fahrweg mit einer Wiederholgenauigkeit von  $1\ \mu\text{m}$  möglich.

Als wesentlicher Beitrag zur Rateninstabilität wurden äußere Umwelteinflüsse wie etwa mechanische Schwingungen aus der Umgebung von DESY identifiziert. Sie verursachen Strahlfluktuationen des Protonenstrahls, welche direkten Einfluss auf Fluktuation der Rate haben. Abbildung 42 zeigt als Beispiel Kurzzeitfluktuationen der Wechselwirkungsrate für eine ausgewählte Woche. Während die Fluktuationen in der Nacht und am Wochenende mit etwa 6% sehr gering ausfallen, steigen sie während der üblichen Arbeitszeiten auf ungefähr das Doppelte an.

Das HERA-B Target ist für die Datennahmeperiode 2001 voll einsatzbereit. Wesentliche Anstrengungen liegen in einer weiteren Verbesserung der Ratenqualität, um eine möglichst hohe Effizienz der HERA-B Datennahme zu erreichen. Dies bedarf weiterhin der Unterstützung und engen Zusammenarbeit mit der HERA-Maschinengruppe.

## Das Vertex-Detektor-System

Das Vertex-Detektor-System (VDS) des HERA-B Experimentes besteht im Endausbau aus 64 doppelseitigen Siliziumstreifenzählern, die in acht „Superlagen“ mit je vier Quadranten den Protonenstrahl umgeben. Insgesamt besteht das System aus fast 150 000 Kanälen. Sieben der acht Superlagen sind zusammen mit dem Target in einem 2.6 m langen UHV-Tank montiert, der Bestandteil des HERA-Protonenringes ist. Die Quadranten einer Superlage bestehen aus jeweils zwei Detektoren inklusive Elektronik und Kühlung, die mittels Manipulatoren bis auf einen radialen Abstand von 1 cm an die Strahlachse herangefahren werden können. Zudem ermöglichen die Manipulatoren eine laterale Bewegung der Detektoren, um die enorme Strahlenbelastung – 30 MHz minimal ionisierende Teilchen pro  $\text{cm}^2$  bei 10 mm Abstand – gleichmäßiger über die Detektorfläche zu verteilen. Die Siliziumzähler werden

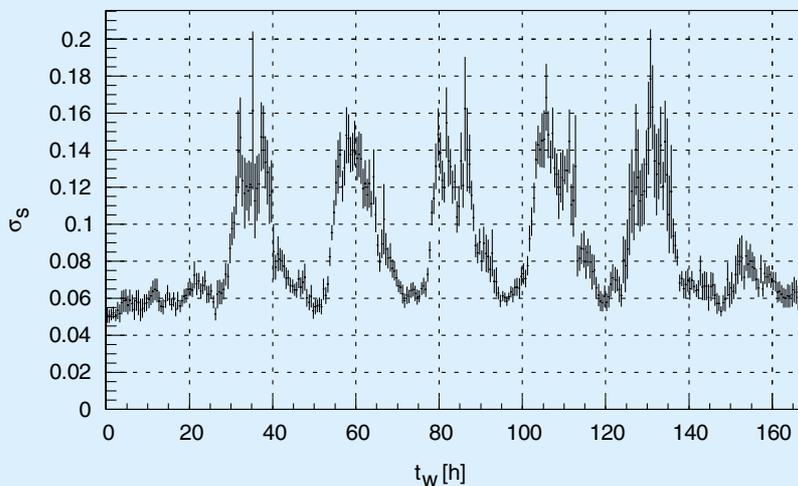


Abbildung 42: Wechselwirkungsrate in Abhängigkeit von der Zeit, dargestellt für einen Wochenverlauf von Sonntag 0.00 Uhr bis Samstag 24.00 Uhr. Zu üblichen Arbeitszeiten sind die Fluktuationen um einen Faktor zwei erhöht.

in einem sekundären Vakuum von etwa  $10^{-6}$  mbar betrieben, das von dem Tankvakuum, typisch  $10^{-8}$  mbar, durch etwa 150 bis 200  $\mu\text{m}$  dünne Aluminiumkappen getrennt ist, wobei diese Kappen zugleich die Detektoren vor den Hochfrequenzfeldern des Protonenstrahls schützen.

Das VDS lief wie in den vergangenen Jahren zusammen mit all seinen Hilfssystemen wie Detektorkühlung, gekoppelten Vakuumsystemen usw., störungsfrei. Die Infrastruktur inklusive der zum schnellen und sicheren Austausch von Modulen nötigen Aufbauten hat sich ausgezeichnet bewährt.

Im März 2000 wurde das VDS mit der Montage der achten Superlage hinter dem Austrittsfenster des Vakuums tanks vervollständigt. Lediglich in den ersten drei Superlagen wurden noch pro Superlage ein doppelseitiger und ein einseitiger Siliziumdetektor (statt zwei doppelseitiger Detektoren) eingesetzt.

Abbildung 43 zeigt die sechs Module eines Quadranten der Superlagen eins bis drei, montiert auf ihrem Detektortopf, vor der Montage der Aluminiumkappen. Die Detektoren sind auf 0.7 mm dicke Gabeln aus Kohlefasern mit extrem hohem Wärmeleitvermögen ( $500 \text{ W/K/m}$ ) montiert, die ihrerseits auf der mittleren Trägerplatte einer Aluminiumstruktur befestigt sind. Die zwei äußeren Platten werden für die Montage



Abbildung 43: Blick auf den äußeren Teil eines Detektortopfes für einen Quadranten der ersten drei Superlagen. Montiert sind sechs Siliziumdetektoren mit ihren Trägerstrukturen und ihrer Ausleselektronik.

der Ausleseelektronik verwendet, die so getrennt vom Detektor gekühlt werden kann. Die Signale werden über sechs flexible Mikroadaptoren zu den 84 Helix-Auslesechips geleitet. Die elektrische Verbindung zur Außenwelt erfolgt über Kaptonkabel, die in der Abbildung in den Vakuumtopf hineinführen.

Das VDS war bereits in der Messperiode 1999 endgültig in Betrieb genommen worden. Die Alignierung des VDS wurde weiter verfeinert. Die Mittelwerte der Verteilungen der Residuen liegen bei unter  $2\ \mu\text{m}$ , die Standardabweichungen liegen für selektierte Spuren hoher Qualität typischerweise bei  $15\ \mu\text{m}$ , gemittelt über alle Impulse.

Die longitudinale Vertexauflösung ist die auf die Qualität der Alignierung sensitivste Messgröße. Sie wird über die Zerfallslängenverteilung direkter  $J/\psi$ -Mesonen indirekt beobachtet. Durch Vergleiche zwischen Monte Carlo-Simulationen und Daten hat sich gezeigt, dass die Alignierung mindestens einmal pro Protonenfüllung durchgeführt werden muss. Für die nächsten Messperioden wird an einer Automatisierung der Alignierungsprozedur gearbeitet.

Die im Jahr 2000 akkumulierte Strahlungsdosis beträgt nur etwa 10% eines nominalen HERA-B Jahres. Demgemäß haben sich die Verhältnisse von Signalhöhe zu Rauschen für die zur Zeit eingebauten Module nicht signifikant geändert. Die S/R-Verteilungen haben für die n-Seiten wahrscheinlichste Werte von über 20, für die p-Seiten liegen sie geometriebedingt zwischen 15 und 20. Die Nachweiswahrscheinlichkeiten der Detektorebenen wurden mit Hilfe von Spuren, die ohne die jeweils untersuchte Detektorebene rekonstruiert worden waren, bestimmt. Typischerweise wurden Effizienzen von etwa 99% erreicht. Ineffizienzen sind im allgemeinen auf Fehlfunktionen einzelner Helixchips zurückzuführen.

Die Programme zur Bestimmung von Primär- und Sekundärvertices wurden wesentlich verbessert. Für Primärvertices wurde eine transversale Auflösung von  $70\ \mu\text{m}$  und eine longitudinale Auflösung von  $500\ \mu\text{m}$  erreicht. Die Abhängigkeit der Auflösungen von den Systemparametern wurden mit Monte Carlo-Ereignissen untersucht, und die Auflösungen wurden anhand von Daten bestätigt. Die Effizienz der Rekonstruktion von Primärvertices beträgt unabhängig von der Wechselwirkungsrate etwa  $(94\pm 1)\%$ . Bei hohen Wechselwir-

Spuren im Vertex	Massenhypothese	$\sigma_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_{x,y}$ [ $\mu\text{m}$ ]
4	nein	$280 \pm 10$	$21 \pm 1$
3	nein	$300 \pm 10$	$24 \pm 1$
2	nein	$375 \pm 10$	$25 \pm 1$
4	ja	$280 \pm 10$	$21 \pm 1$
2	ja	$325 \pm 10$	$26 \pm 1$

Tabelle 1: *Räumliche Auflösung für sekundäre Vertices in Abhängigkeit von der Anzahl der Spuren im Vertex, mit und ohne Benutzung einer Massenhypothese als zusätzliche Bedingung in der Vertexrekonstruktion.*

kungsraten werden aber Vertices verschmolzen, und so genannte Klonvertices treten verstärkt auf. Mit nur im Vertexdetektor rekonstruierten Spuren und Vertices konnte eine Untersuchung zur Abhängigkeit der geladenen Multiplizität von der Kernmassenzahl der Targetmaterialien durchgeführt werden. Die Ergebnisse bestätigen die Erwartungen.

Die sekundäre Vertexauflösung wurde mit Monte Carlo-Ereignissen studiert. Die Ergebnisse sind von der Multiplizität der Sekundärvertices abhängig. Für sekundäre Vertices mit 2 Spuren werden unter Benutzung einer Massenhypothese und einer angenommenen Impulsauflösung von 1% eine transversale Auflösung von etwa  $25\ \mu\text{m}$  und eine longitudinale Auflösung von etwa  $325\ \mu\text{m}$  erreicht. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die für verschiedene Konstellationen erreichten Auflösungen.

Eine Überprüfung der Breite der Zerfallslängenverteilung direkter  $J/\psi$ -Mesonen ist nur indirekt möglich, da beim Zerfall des  $J/\psi$ -Mesons innerhalb des Drahtes die Teilchen bereits im Material gestreut werden. Ein Vergleich zwischen Monte Carlo-Rechnungen und Daten bestätigt die Erwartungen der Rechnungen.

In den Daten sind einige gute Kandidaten für Zerfälle von b-Hadronen nachgewiesen worden. Die Messung des b-Hadron-Wirkungsquerschnitts ist zur Zeit durch die geringe Statistik, nicht aber durch die Auflösung des VDS begrenzt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Vertex-Detektor-System im Jahr 2000 seine Designparameter weitgehend erreicht hat.

## Inneres Spurkammersystem

Das innere Spurkammersystem besteht aus Mikrostreifen-Gasdetektoren (MSGC) mit integrierter Vorverstärkerfolie (GEM). Im Jahr 2000 wurde die geplante Installation von 16 Stationen abgeschlossen, so dass 136 GEM-MSGCs mit mehr als 100 000 analogen Auslesekanälen kontinuierlich betrieben werden konnten.

Die Installation des inneren Spurkammersystems begann im Juni 1999. Bedingt durch unerwartete Schwierigkeiten bei der externen Produktion der MSGC-Wafer und der Ausleseelektronik wurde die Installation im Magnet und in der Region zwischen Magnet und RICH erst im Mai 2000 abgeschlossen. Gleichzeitig wurde die Installation des gesamten Auslesesystems für diese Stationen durchgeführt.

Ende 1999 zeigte sich an den bereits in HERA-B eingebauten Stationen, dass die Front-End-Elektronik zu oszillieren beginnt, sobald sie bei niedrigen Trigger-Schwellen betrieben wird, wie sie notwendig sind, um mit sinnvoller Effizienz Trigger-Signale ableiten zu können. Aus diesem Grund wurde auf den Einbau von vier weiteren Stationen zwischen RICH und ECAL verzichtet, da diese Stationen fast ausschließlich als Trigger-Stationen für den First-Level-Trigger benötigt werden.

Alle eingebauten Stationen wurden in der Datennahmeperiode 2000 kontinuierlich betrieben. Die schwierige Steuerung so vieler GEM-MSGCs (HV, LV, Slow Control) erforderte meist 24 Stunden pro Tag eine eigene Schichtbesatzung für das innere Spurkammersystem. Die wesentlichen Betriebsprobleme, die in dieser Periode auftraten, waren

- Ausbildung von Kurzschlüssen zwischen Anoden und Kathoden auf dem MSGC-Wafer,
- Gasentladungen zwischen der GEM-Folie und Anoden bzw. Kathoden,
- Gasentladungen innerhalb der GEM-Folie,
- Ausfälle von Niederspannungs-Netzgeräten.

Das Ausbilden von Kurzschlüssen zwischen Anoden und Kathoden konnte durch besonders langsames Konditionieren der Kammern bei Targetbetrieb stark verringert werden.

Gasentladungen zwischen GEM-Folien und Anoden bzw. Kathoden sind besonders gefährlich, da sie zu großflächigen Zerstörungen der MSGC-Wafer führen können. Nachdem die Driftfeldstärken deutlich verringert wurden, sind derartige Gasentladungen nicht mehr aufgetreten. Dies führte aber zu einer Reduktion der Gasverstärkung im GEM sowie auf dem MSGC-Wafer. Um dies zu kompensieren, musste die Spannungsdifferenz und damit die Gasverstärkung sowohl im GEM als auch zwischen Anoden und Kathoden erhöht werden, wodurch wieder ein höheres Risiko für Kurzschlüsse im GEM und zwischen Anoden und Kathoden bedingt wird.

Gasentladungen innerhalb der GEM-Folie lassen sich nicht gänzlich vermeiden. Dank einer aufwändigen Steuerung der GEM-Hochspannungen und sehr schneller Hardware-Sicherungen gab es kaum Probleme. Während der ganzen Run-Periode 2000 gab es nur drei Ausfälle von Kammern aufgrund von GEM-Kurzschlüssen, ausgelöst durch Gasentladungen innerhalb der GEM-Folie, wovon an Wartungstagen zwei GEMs durch Einspeisen starker Stromstöße gerettet werden konnten.

Die zugekauften Netzgeräte für die Niederspannungsversorgung der einzelnen Stationen erwiesen sich als extrem störanfällig. Dabei handelt es sich um eine spezielle Entwicklung für die inneren Spurkammern von HERA-B, da es bisher keine passenden Spannungsversorgungsmodule mit CAN-Bus Anbindung gab, die auf veränderliche Last reagieren können. In zwei Fällen hat der Ausfall von Modulen sogar zur Zerstörung von Ausleseelektronik geführt und erforderte die Reparatur der betroffenen Stationen außerhalb des Experiments. In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma der Netzgeräte konnten diverse technische Probleme identifiziert und an einigen Modulen behoben werden. Bis zu Beginn der nächsten Run-Periode werden alle Netzgeräte umgerüstet, so dass eine erhebliche Verbesserung der Betriebsstabilität gewährleistet sein sollte.

Als besonders erfreulich und stabil erwies sich das Gassystem. Trotz der enormen Anforderung, bis zu 16 Kreisläufe auf maximal 50  $\mu$ bar Differenzdruck gegenüber dem Umgebungsdruck zu regeln, traten keine Probleme auf.

Die Bestimmung der Effizienzen aller in der Datennahmeperiode 2000 betriebenen GEM-MSGCs mit Hilfe

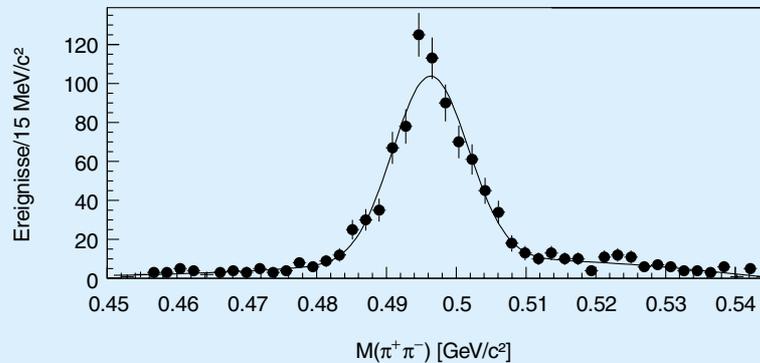


Abbildung 44: *Invariante Masse von  $\pi^+\pi^-$ -Paaren mit deutlich sichtbarem  $K_S^0$ -Signal. Mindestens eines der Pionen wurde ausschließlich mit Signalen aus dem inneren Spurkammersystem rekonstruiert.*

der genommenen Daten ist noch nicht abgeschlossen und wird weitergeführt. Erste Effizienz-Messungen zeigten starke Variationen von Kammer zu Kammer und lagen zwischen 65% und 85%. Nachdem in einem Teilsystem des inneren Spurkammersystems die Gesamtgasverstärkung generell erhöht sowie die unterschiedlichen Gasverstärkungen in den GEMs durch individuelle Anpassung der GEM-Spannungen kompensiert worden waren, reduzierten sich die Effizienz-Variationen für diese Kammern auf etwa 5%. Die zugehörigen Einzelkammer-Effizienzen betragen 91% bis 97%.

Mit vier Stationen in der Region zwischen Magnet und RICH konnte schon bis Mai 2000 gezeigt werden, dass die Auslese der Trigger-Kette störungsfrei funktioniert und in den First-Level-Trigger integriert werden kann. Auf eine ständige Einbindung in den First-Level-Trigger wurde aufgrund der zu niedrigen Trigger-Effizienzen verzichtet.

Die intensive Weiterentwicklung der Front-End-Elektronik, der daran anschließenden Trigger-Elektronik (Trigger-Treiber-Boards) und des Erdungsschemas zeigte im April 2000 im Labor, dass ein Betrieb mit hinreichend niedrigen Trigger-Schwellen möglich ist. Um die Verbesserungen unter den tatsächlichen HERA-B Bedingungen zu testen, wurde eine weitere Station gebaut und Anfang Juli 2000 zwischen RICH und ECAL installiert. Diese Station zeigte im Experiment dasselbe Verhalten wie im Labor; die damit gemessenen Trigger-Effizienzen sind größer als 95%.

Abbildung 44 demonstriert, dass Spuren allein im inneren Spurkammersystem, ohne Berücksichtigung anderer Detektorkomponenten, rekonstruiert werden können. Sie zeigt die invariante Masse zweier Pionen mit deutlichem Signal für den Zerfall  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Es wurde die Bedingung gestellt, dass mindestens eines der Pionen ausschließlich mit Signalen aus dem inneren Spurkammersystem rekonstruiert worden war.

Mit Beginn der Luminositätserhöhung von HERA im September 2000 werden alle bisher eingebauten innere Spurkammer-Stationen überholt und verbessert. Dies beinhaltet

- Ersetzen von defekten Kammern,
- neues und verbessertes Erdungsschema für alle Kammern,
- neue und bessere HV-Verbindungen für alle Kammern,
- Beheben der im Betrieb entstandenen Anoden-Kathoden Kurzschlüsse,
- Bau der noch fehlenden drei Stationen für den Bereich zwischen RICH und ECAL,
- neue HELIX-128-3.2 Auslesechips für alle Trigger-Kammern (96 von 184),
- neue Trigger-Treiber-Boards (48 Stück) für alle Trigger-Stationen,
- Umrüsten aller Niederspannungs-Netzgeräte.

## Äußeres Spurkammersystem

Das äußere Spurkammersystem von HERA-B dient dem Nachweis geladener Teilchen. Der Akzeptanzbereich der Kammern erstreckt sich von einem Abstand von 20 cm zum Protonenstrahl bis hin zur äußeren Grenze des Experiments. Das Kammersystem umfasst insgesamt 13 Messstationen, so genannte Superlagen, die zwischen Vertextank und Kalorimeter an verschiedenen Positionen senkrecht zum Strahl angeordnet sind. Jede Superlage besteht aus zwei mechanisch unabhängigen Hälften, die von beiden Seiten Protonen- und Elektronenstrahlrohr einschließen. Jede Hälfte besteht aus einer gasdichten Box, in der sich mehrere Driftkammerlagen befinden. Zusammengesetzt sind diese Lagen aus etwa 30 cm breiten und 1 bis 4.5 m langen Honigwabekammer-Modulen. Ein massiver äußerer Rahmen gibt der Gasbox stabilen Halt.

Die elektrische Auslese der Kammern besteht aus 7200 Vorverstärkern mit integriertem Diskriminator, die sich direkt an den Gasboxen befinden und die Kammerpulse aufnehmen. Eine Zeitmessung der digitalisierten Pulse erfolgt durch 955 TDC-Karten („Time-to-Digital Converter“), die am Kammerrahmen montiert sind. Die Daten werden bei einer positiven Entscheidung der ersten Triggerstufe mit 15 MByte/s zum Zwischenspeicher der zweiten Triggerstufe übertragen. Gleichzeitig stellen die TDC-Karten für jedes Ereignis die Trefferinformation für die erste Triggerstufe zur Verfügung. Hierzu werden die digitalen Ausgangssignale mittels so genannter Triggerlink-Karten in optische Signale umgewandelt.

Der mechanische und elektrische Aufbau des Kammer-systems wurde Anfang Januar 2000 mit der Installation der letzten Magnet-Kammer abgeschlossen.

Das gesamte äußere Spurkammersystem wurde bereits im Januar mit Gas gespült. Vollständig fertig gestellt wurde das Gassystem allerdings erst im Verlauf des Frühjahrs. Als Zählgas wird eine Mischung von  $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{CO}_2$  (65:30:5) verwendet. Das Gas wird vom Gassystem automatisch angemischt und zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf bei einem leichten Überdruck von etwa 0.5 mbar. Die im Jahr 2000 beobachteten Mischungsverhältnisse und Druckwerte entsprachen den Designwerten. Nach Installation aller Umwälzpumpen konnten auch alle Kammern wie vorgese-

hen mit einem Gasfluss von etwa einem Volumen pro Stunde gespült werden, was einer Umwälzung von insgesamt  $18 \text{ m}^3$  pro Stunde entspricht. Die Frischgaszufuhr wurde auf Werte zwischen 0.5% und 2% eingeregelt, um den Verbrauch an teurem  $\text{CF}_4$  zu minimieren. Auch das Reinigungssystem zum Entfernen von Sauerstoff, Wasser und Polymerverbindungen konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden. Während der gesamten Datennahme im Jahr 2000 hat das Gassystem die Kammern zuverlässig mit Gas versorgt.

Die automatische Hochspannungssteuerung der Kammern war bis auf eine anfängliche Trainingsperiode während der gesamten Datennahme in die zentrale HERA-B Detektorkontrolle integriert. Die Hochspannung betrug je nach Modultyp 1700 V bzw. 1850 V, was einer Gasverstärkung von  $3 \times 10^4$  entspricht. Anzeichen für Kathoden- oder Anodenalterung wurden bisher nicht festgestellt. Im Verlauf des Kammerbetriebes traten allerdings Probleme mit der Hochspannungsfestigkeit der Driftkammermodule auf. Bis August zeigten etwa 0.5% der Zellen endliche elektrische Widerstände bzw. Kurzschlüsse. Aufgrund der Auslegung der Hochspannungsversorgung führte dies zu einem Ausfall von etwa 7% der Driftzellen. Bewirkt wurden die Ausfälle durch produktionsbedingte Verunreinigungen der Koppelkondensatoren und nicht, wie zunächst angenommen, durch eine elektrostatische Instabilität der Kammermodule. Betroffen sind zwei der siebzehn Kondensatoren jeder Hochspannungskarte. Es ist geplant, alle verschmutzten Kondensatoren, insgesamt 14 000 Stück, bis Mai 2001 auszutauschen.

Sowohl die elektrische Auslese der Kammern als auch die Steuerung und Überwachung der Kammerelektronik arbeitete im Jahr 2000 von Anfang an zuverlässig. Die Inbetriebnahme der optischen Linkverbindungen zwischen TDC und Triggerlogik hat sich dagegen bis in den Frühsommer 2000 verzögert. Die Signale der optischen Sender zeigten zeitliche Änderungen in Form und Pulshöhe, was zu Übertragungsfehlern führte. Betroffen waren zwischen 5 und 10% aller optischen Links. Um in Zukunft alle Links zuverlässig betreiben zu können, werden bis Mai 2001 alle Sender mit einer zusätzlichen Steuerung ausgerüstet.

Gleichzeitig mit der Inbetriebnahme der Detektorhardware wurden Softwarepakete zur automatischen Kontrolle der Datenqualität entwickelt. Die Kalibrationskonstanten aller 115 000 Kanäle wurden „online“ be-

rechnet. Gleichzeitig wurde das Verhalten jedes einzelnen Kanals getestet und seine Verwendbarkeit für die Spurrekonstruktion untersucht.

Eine wichtige Größe, die die Funktion des Detektors beschreibt, ist die Zelleffizienz. Ihre Messung ergab je nach Kammer und Betriebsbedingungen Werte zwischen 85% und 95%. Um für alle Kammern eine Effizienz von mindestens 95% zu erreichen, ist eine Optimierung der Gasverstärkung und auch der Diskriminatorschwellen notwendig. Letzteres soll in Zukunft durch eine weitere Unterdrückung des Detektorrauschens erzielt werden. Insbesondere für die im Trigger verwendeten Superlagen bewirkten die Kabelverbindungen zwischen TDC-Karten und Triggerlink-Karten zusätzliches Rauschen. Die Ursache ist mittlerweile verstanden und wird durch eine Modifikation der TDC-Karten bis zum Mai 2001 behoben sein.

Um eine Rekonstruktion der Teilchenspuren zu ermöglichen, müssen die Positionen der Kammern exakt bekannt sein. Im Fall der äußeren Spurkammern sind 26 Kammerhälften mit insgesamt 1000 mechanisch unabhängigen Modulen auszurichten. Dieses „Alignieren“

wurde für mehrere Zeitperioden erfolgreich durchgeführt. Nach dem Ausrichten der Module beträgt die über alle Zellen gemittelte Residuenauflösung etwa 500  $\mu\text{m}$ . Der Vergleich mit der Einzelzellauflösung von zur Zeit 350  $\mu\text{m}$  legt nahe, dass eine weitere Verbesserung der Modulpositionierung zu erzielen ist.

Auch im Bereich der Rekonstruktionssoftware wurden im Jahr 2000 große Fortschritte erzielt: Durch Anpassung der Spuralgorithmen an den realen Detektor wurde die Effizienz für die Spurfindung auf Werte zwischen 80% und 90% erhöht. Gleichzeitig wurden die Spuralgorithmen auf die im Magneten befindlichen Kammern ausgedehnt. Abbildung 39 zeigt ein Ereignis, bei dem 126 Teilchenspuren rekonstruiert wurden.

Das Jahr 2000 war für den Betrieb des äußeren Spurkammersystems ein erfolgreiches Jahr. Der Detektor wurde komplettiert und war während der gesamten Datennahme verfügbar. Trotz der angesprochenen Hochspannungsprobleme lieferte der Detektor Daten guter Qualität. Rekonstruktion und Detektorverständnis sind in diesem Jahr erheblich vorangekommen.

## Čerenkov-Detektor

Der Čerenkov-Detektor wurde Anfang 1998 in Betrieb genommen und läuft seitdem stabil und gemäß den Erwartungen.

Um die Effizienz der Teilchenidentifikation zu bestimmen, wurde eine Analyse von Ereignissen mit bekannten Teilchen im Endzustand, zum Beispiel mit den Zerfallsprodukten von  $K_S^0$ - und  $\Lambda$ -Zerfällen durchgeführt, bei denen die Teilchenart allein durch den Zerfallsvertex und die invariante Masse der zerfallenden Teilchen bestimmt werden kann (Abb. 45). Um das Verhalten bei hohen Energien zu bestimmen, wurde der Zerfall  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  untersucht. Abbildung 46 zeigt die abgeleiteten Identifikationseffizienzen und die Wahrscheinlichkeit für Falschidentifikationen.

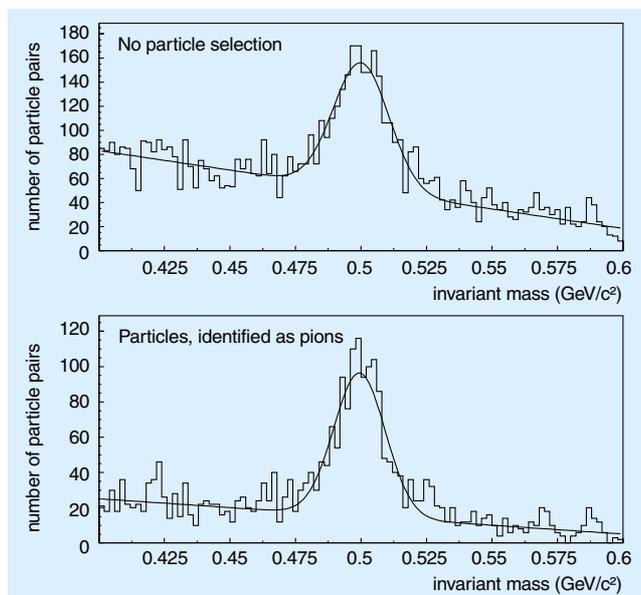


Abbildung 45:  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  Kandidaten: Invariante Masse zweier Teilchen mit rekonstruiertem Sekundärvertex mit und ohne die Bedingung, dass beide Teilchen als Pionen identifiziert sind.

## Trigger und Datennahme

Die Aufgabe des vierstufigen Triggersystems von HERA-B ist es, bei hoher Effizienz Zerfälle schwerer Quarks zu identifizieren und gleichzeitig den enor-

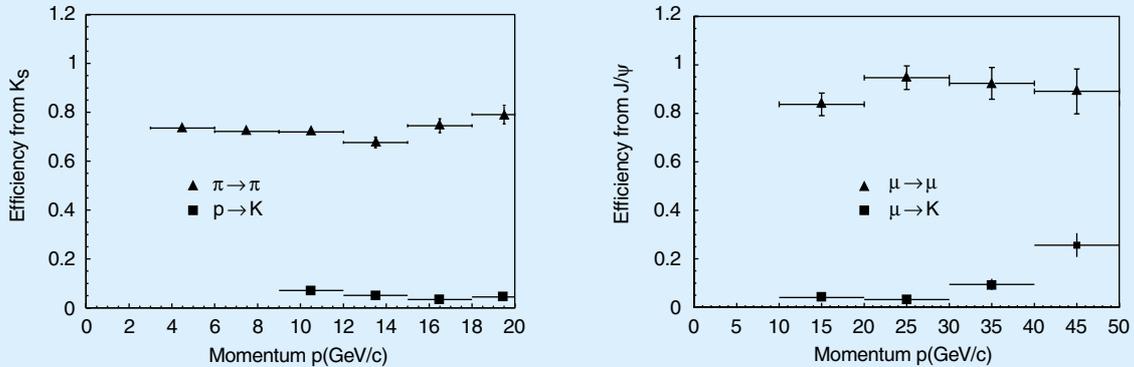


Abbildung 46: Identifikationseffizienz als Funktion des Impulses: Links: Effizienz (Dreiecke) und Falschidentifikationen (Quadrate) von Pionen, abgeleitet aus dem Zerfall  $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ . Rechts: Dasselbe für Myonen aus dem Zerfall  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

men Untergrund von sonstigen unelastischen Proton-Wechselwirkungen zu unterdrücken. Die Wechselwirkungsrate von 5 bis 40 MHz muss sukzessiv auf eine Rate von etwa 50 Hz reduziert werden, mit der die Daten aufgezeichnet werden können. Das Triggerkonzept basiert wesentlich auf der Identifikation von Elektronen und Myonen aus  $J/\psi$ -Zerfällen und aus semileptonischen Zerfällen schwerer Mesonen.

Die erste Triggerstufe („First Level Trigger“ FLT) wählt  $J/\psi$ -Kandidaten anhand der Kinematik der beiden Zerfallsleptonen aus. Letztere haben einen großen Transversalimpuls und werden von den vorgeschalteten Pretriggern im elektromagnetischen Kalorimeter und den Myonkammern gesucht. Der FLT erhält die Parameter der Kandidaten und benutzt die Liste der getroffenen Drähte in den Spurkammern nach dem Magneten, um vom Kalorimeter aus die Spuren in Richtung Target zu verfolgen. Wird in einer Lage der Spurkammern innerhalb eines Suchfensters kein getroffener Draht gefunden, wird der Kandidat verworfen. Andernfalls wird ein neues Suchfenster für die nächste Lage berechnet und dort nach getroffenen Drähten gesucht. Am Ende der Kette ist die Leptonspur gut vermessen und Schnitte auf den Transversalimpuls können angewandt werden. Werden mehrere Leptonen gefunden, kann die invariante Masse von Paaren berechnet und mit der  $J/\psi$ -Masse verglichen werden.

Der FLT ist als modularer Elektronik-Trigger mit etwa 100 Prozessoren realisiert. Der Aufbau des Systems

und Vorstudien zu seiner Leistungsfähigkeit sind in den Vorjahresberichten beschrieben. Im Jahr 2000 wurde der FLT mit Ausnahme eines Teils der für die inneren Spurkammern benötigten Komponenten installiert. Die Produktion aller Komponenten wurde erfolgreich abgeschlossen.

Im Berichtszeitraum wurde der FLT in Betrieb genommen. Zuerst wurden die einzelnen Prozessoren und Datenübertragungselemente allein getestet. Da dieser Test im Wesentlichen eine Wiederholung von Labortests beim Produktionsabschluss war, traten erwartungsgemäß kaum Probleme auf.

Im nächsten Schritt wurden die Datenverbindungen zwischen den Prozessoren getestet. Dabei gab es sowohl in der Interprozessor-Kommunikation als auch bei der Datenübertragung von den Spurkammern zu den FLT-Prozessoren Probleme, bei letzterer sogar erhebliche.

In der Vernetzung der Prozessoren untereinander traten sporadische Übertragungsfehler auf, die durch regelmäßig durchgeführte Tests erkannt und durch Rücksetzen des Systems beseitigt werden konnten. Die Ursache für das Fehlverhalten konnte auf Probleme in einer Spannungsversorgung zurückgeführt werden. Eine geplante geringfügige Modifikation der beteiligten Komponenten wird diese Datenverbindungen hinreichend stabilisieren.

Methode	Myonen		Elektronen
	Spur	J/ $\psi$	Spur
Referenzspuren Online	0.2...0.6	–	0.74
Referenzspuren Simulation	–	–	0.59
Ausgewählte J/ $\psi$ -Ereignisse	0.23	0.05	–
Einzelspur aus J/ $\psi$ -Raten Vergleich	0.19	–	–
Monte Carlo-Erwartung	0.33	0.10	–

Tabelle 2: Akzeptanz des FLT mit verschiedenen Analysemethoden. Alle Werte beinhalten Detektoreffizienzen, aber nicht die Pretrigger-Akzeptanz. Die unterschiedlichen Methoden werden im Text erklärt.

Die Daten der Spurkammern werden mit optischen Fasern über eine Distanz von 50 m optisch übermittelt. Es werden ungefähr 2000 Datenströme mit jeweils 900 Mbit/s Datenrate eingesetzt. Zu Beginn waren etwa 10% dieser optischen Verbindungen fehlerbehaftet. Zu den Ursachen zählten Verkabelungsfehler, unzureichende Spannungsversorgung am Sender, zeitliche Veränderungen der optischen Senderleistung, Ausfall von Komponenten und fehlerhafte Programmierungen von PLDs, die die Geometrie der Spurkammern auf die des FLT abbilden. Gegen Ende der Datennahmepériode konnten fast alle Probleme behoben werden – es traten allerdings immer wieder sporadisch neue auf. Durch Vereinfachung der Einstellung der optischen Senderleistung, neue Testverfahren der gesamten Datenstrecke und Beheben der Softwareprobleme sollte ein zuverlässiger Betrieb in Zukunft möglich sein.

Ein wesentlicher Schritt der Inbetriebnahme ist das Prozessieren von simulierten Ereignissen durch die installierte Prozessor-Hardware inklusive der Datenübertragungsstrecken. Nachdem die Simulationswerkzeuge auf den entsprechenden Stand gebracht worden waren, konnte keinerlei Abweichung der simulierten Prozessorantwort von der des installierten Systems festgestellt werden. Der Vergleich erfolgte schrittweise für jede Prozessstufe. Allerdings konnten nur kleine Teile des Systems zusammen getestet werden. Ein Test des Gesamtsystems mit Vergleich zur Simulation in jedem Prozessschritt steht noch aus. Die dazu notwendige aufwendige Software ist in Vorbereitung.

Die Leistungsfähigkeit des FLT misst sich in zwei wesentlichen Parametern: der Akzeptanz für die inter-

essanten Ereignisse und der Unterdrückung uninteressanter Ereignisse. Da HERA-B im Jahr 2000 fast ausschließlich bei kleinen Wechselwirkungsraten betrieben worden ist und nur ein Teil der räumlichen Akzeptanz des geplanten Systems in Betrieb war, sind die gemessenen Ausgangsraten nicht mit den Designwerten vergleichbar. Eine Analyse der Rate und Extrapolation zum vollständigen Detektor mit voller Wechselwirkungsrate unter Verwendung der Simulation steht noch aus. Das Hauptaugenmerk ist auf die Akzeptanz gerichtet worden. Dabei ist zunächst die Akzeptanz für einzelne Spuren interessant und dann die Akzeptanz für J/ $\psi$ -Ereignisse. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst und werden nachfolgend diskutiert.

Ereignisse, die mit einem Zufallstrigger ausgewählt werden und für die die FLT-Entscheidung aufgezeichnet wird, sind zur Bestimmung der Einzelspur-Akzeptanz geeignet. Elektronen, die mit dem RICH und dem elektromagnetischen Kalorimeter rekonstruiert werden, dienen als Referenzspuren und sollten auch vom FLT und von der FLT-Simulation gefunden werden. Die Akzeptanz ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl von Referenzspuren, die durch FLT-Spuren beschrieben werden, zur Gesamtzahl der Referenzspuren.

Für Myonenspuren kann die Zuordnung von FLT-Spuren zu rekonstruierten Spuren nur durchgeführt werden, wenn Information aus dem Myon-Detektor zur Referenzspur-Rekonstruktion verwendet wird. Diese Rekonstruktion wählt Myonen aus, die vom FLT gut erkannt werden können, daher ist das Ergebnis nicht repräsentativ für alle Myonen. Je nach verlangter Qualität

der Referenzspur variiert die Zuordnungswahrscheinlichkeit zu einer aufgezeichneten FLT-Spur von 20% bis 60%.

Die Akzeptanz für  $J/\psi$ -Ereignisse wurde mit der FLT-Simulation aus den Daten abgeschätzt. Myonenpaare mit einer invarianten Masse nahe der  $J/\psi$ -Masse bilden eine Myonenquelle, die mit wenig Information aus dem Myon-Detektor auskommt und deswegen ein gutes Umfeld zur Untersuchung von FLT-Eigenschaften darstellt. Solche Ereignisse sind leider nur ohne aufgezeichnete FLT-Information vorhanden, so dass Aussagen über die FLT-Akzeptanz nur mit Hilfe der Simulation möglich sind. Der Anteil von Myonen, die durch die FLT-Simulation gefunden werden, ist 23%.

Alternativ kann die Myon-Akzeptanz des FLT aus  $J/\psi$ -Produktionsraten unter verschiedenen Triggerbedingungen berechnet werden. In einem Fall wurde keine FLT-Information im Trigger verwendet, im anderen wurde mindestens eine Myonspur mit dem FLT gefunden. Eine Korrektur von 0.96 berücksichtigt den Unterschied in der SLT-Akzeptanz in den beiden Betriebsmoden. Wir finden 19% als Einzelspur-Akzeptanz. Diese sehr direkte Berechnung ist in guter Übereinstimmung mit den anderen Messmethoden.

Der FLT ist nahezu komplett installiert und in Betrieb genommen. Probleme, die in den Datenübertragungstrecken auftraten, sind größtenteils gelöst oder werden vor der nächsten Datennahmeperiode gelöst sein. Die Akzeptanz des FLT für Einzelspuren ist relativ gut verstanden. Potential zur Verbesserung der Akzeptanz liegt zum einen in der Verbesserung der Datenübertragung und zum anderen in der Reparatur der nicht funktionierenden Spurkammern. Die Akzeptanz für Spurpaare konnte noch nicht direkt bestimmt werden, da in diesem Betriebsmodus keine  $J/\psi$ -Mesonen beobachtet werden konnten. Die Analyse dieses Problems dauert noch an.

## Die zweite Triggerstufe

Die zweite Stufe des HERA-B Triggers („Second Level Trigger“ SLT) ist vollständig in das Datennahmesystem integriert und benötigt daher im Gegensatz zur ersten Stufe keinen separaten Datenpfad. Der Algorithmus dieses Filters ist komplett in C programmiert

und wird auf kommerziell erhältlichen PCs mit dem Betriebssystem Linux ausgeführt.

Aufbauend auf der Information der ersten Triggerstufe werden zunächst die Parameter der Spuren, die der FLT gefunden hat, besser bestimmt, dann die Spur in den Vertexdetektor weiterverfolgt und schließlich gefordert, dass die Spuren eines Paartriggers einen gemeinsamen, eventuell vom Hauptvertex verschiedenen Vertex haben.

Die zweite Triggerstufe wurde im Berichtsjahr auf ihre endgültige Ausbaugröße von 240 Prozessoren erweitert. Damit ist die volle PC-Farm einsatzbereit. Diese stellt die größte am DESY betriebene Computerfarm dar.

Der SLT ist in zwei grundsätzlich verschiedenen Weisen betrieben worden: unabhängig vom FLT und dem FLT nachgeschaltet. Im unabhängigen Modus konnten mehrere Tausend  $J/\psi$ -Ereignisse in beiden leptonischen Zerfallskanälen aufgezeichnet werden. Zusammen mit dem SLT wurden nahezu alle FLT-Studien durchgeführt und durch Vergleich der beiden Betriebsweisen wesentliche Schlüsse auf Eigenschaften des FLT gezogen.

Der Algorithmus des SLT benötigt Startbedingungen für die Spurensuche, so genannte „track seeds“. Diese wurden ohne den FLT entweder durch Emulation der Leptonen-Identifikation des FLT oder durch die Pretrigger erzeugt. Die so gefundenen Suchfenster, die signifikant größer sind als die vom FLT ausgegebenen, werden der normalen SLT-Prozesskette übergeben: Zuerst werden durch eine schnelle Histogrammiertechnik falsche Spuren in den Regionen im Bereich zwischen Magnet und ECAL verworfen (SLICER). Danach werden dort die Spuren durch einen Fit zunächst in der  $x$ - $z$  (REFIT-X) und dann in der  $y$ - $z$  (REFIT-Y) Ebene bestimmt. Die Spuren werden durch den Magneten zurückverfolgt und schließlich durch den Vertexdetektor bis zum Hauptvertex verlängert (L2SILI); abschließend werden die Vertices von Spurpaaren gefunden (L2VERTEX).

Die Akzeptanz der SLT-Algorithmen wurde durch Monte Carlo-Simulation des Detektors bestimmt. Die generierten  $J/\psi$ -Ereignisse wurden mit den gleichen Programmen prozessiert, die auch während der Datennahme benutzt wurden, um die Eigenschaften des

Algorithmus	Realistischer OTR		Idealer OTR	
	$e^+e^-$	$\mu^+\mu^-$	$e^+e^-$	$\mu^+\mu^-$
SLICER	0.99	0.99	1.00	1.00
REFIT-X	0.92	0.91	0.94	0.96
REFIT-Y	0.93	0.97	0.97	0.99
L2SILI	0.88	0.89	0.92	0.94
L2VERTEX	0.97	0.98	0.97	0.98
Insgesamt	0.72	0.76	0.81	0.88

Tabelle 3: Mit Monte Carlo-Simulationen bestimmte Akzeptanz des SLT für leptonisch zerfallende  $J/\psi$ -Ereignisse. Die Algorithmen sind im Text beschrieben.

SLT zu bestimmen. Tabelle 3 listet die Akzeptanz der verschiedenen Algorithmen auf.

Der SLT war während der Datennahmepériode 2000 der meistbenutzte Trigger. Alle benötigten Bestandteile sind in der Endausbaustufe ausgiebig und erfolgreich getestet worden. Die Akzeptanz ist stark abhängig von der Qualität der verwendeten Detektor-Information, aber schon nahe den idealen Werten. Aussagen zur Triggerrate hängen stark ab von der Eingangsinformation, die der FLT liefert.

## Triggerstufe 4 und Rekonstruktionsfarm

Das Trigger- und Datenerfassungssystem von HERA-B beinhaltet als vierte Stufe (L4) eine Linux-PC-Farm zur Ereignisrekonstruktion im Echtzeitbetrieb. Damit stehen rekonstruierte Ereignisse unmittelbar nach der Datenspeicherung für weitergehende Physikanalysen zur Verfügung.

Die Farm besteht aus 100 PCs mit je zwei Intel Pentium-III/500 MHz Prozessoren, die in ein Fast-Ethernet Netzwerk integriert sind. Das System wurde geplant, um Ereignisraten von 50 Hz zu verarbeiten.

Neben der Ereignisrekonstruktion hat die Farm die Aufgabe, eine Ereignisklassifikation und -selektion (L4-Trigger) durchzuführen und die Datenarchivierung vorzubereiten. Außerdem werden während der Rekon-

struktion Informationen gesammelt, die zur Qualitätskontrolle sowie zur Alignierung und Kalibration des Detektors verwendet werden. Aktualisierte Konstanten werden anschließend zur weiteren Verwendung an das Triggersystem zurückgegeben.

Der Aufbau der Farm wurde Ende 1999 abgeschlossen und in der Laufperiode 2000 erfolgreich in Betrieb genommen. Seit Ende 2000 wird die Farm zum Reprozessieren der aufgezeichneten Ereignisdaten verwendet. Dazu wird dieselbe Software wie bei der Online-Datennahme betrieben, wobei die Rohdaten von Band gelesen und auf die Farmknoten verteilt werden.

Insgesamt wurden im Berichtsjahr etwa 30 Millionen Ereignisse gespeichert. Die gesamte Datenmenge einschließlich Kalibrationsläufen und reprozessierten Ereignissen beträgt fast 10 TB, die auf Bändern archiviert sind.

Im Rahmen des Farmprojekts wurde die Rekonstruktionssoftware in das Rekonstruktionsprogramm integriert, das zur Zeit 4.5 Sekunden für ein Ereignis eines getriggerten Runs mit 5 MHz Wechselwirkungsrate benötigt. Damit kann die Farm die geplante Ereignisrate von 50 Hz bewältigen.

## Physikanalyse

### Übersicht

Bei der Inbetriebnahme des Detektors und des Triggersystems im Jahr 2000 wurden große Datensätze unter verschiedenen Betriebsbedingungen aufgezeichnet. Diese Daten dienen nicht nur zum technischen Verständnis des Detektors, sondern erlauben auch erste interessante Physikanalysen:

- Es wurden  $4 \cdot 10^6$  unelastische Proton-Kern-Stöße mit verschiedenen Drahttargets aufgezeichnet. Diese Daten dienen zur Messung von inklusiven Spektren ( $p$ ,  $p_T$ ,  $x$  usw.) und von relativen Produktionsraten identifizierter geladener Teilchen und von  $V^0$ -Teilchen. Darüber hinaus sind die Daten wichtig für systematische Studien, beispielsweise zur Messung der Luminosität, oder zur Untersuchung von Untergrund in Datensätzen, die mit restriktiven Triggern aufgezeichnet wurden.

Zerfall	Signal Ereignisse	Rek. Masse [MeV/c <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [MeV/c <sup>2</sup> ]	PDG Wert [MeV/c <sup>2</sup> ]
$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$7973 \pm 133$	$496.5 \pm 0.1$	$6.0 \pm 0.1$	$497.67 \pm 0.03$
$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	$500 \pm 39$	$1115.4 \pm 0.2$	$1.9 \pm 0.2$	$1115.684 \pm 0.006$
$\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p} \pi^+$	$337 \pm 37$	$1115.9 \pm 0.3$	$2.6 \pm 0.4$	$1115.684 \pm 0.006$
$K_{890}^0 \rightarrow K^- \pi^+$	$958 \pm 130$	$890.0 \pm 4.0$	$53.0 \pm 6.0$	$896.1 \pm 0.3$
$K_{890}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	$1336 \pm 143$	$894.0 \pm 5.0$	$48.0 \pm 5.0$	$896.1 \pm 0.3$
$\phi_{1020} \rightarrow K^- K^+$	$274 \pm 38$	$1019.9 \pm 0.6$	$7.0 \pm 1.0$	$1019.0 \pm 0.008$
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	$59 \pm 10$	$1852.0 \pm 5.0$	$27.0 \pm 5.0$	$1864.5 \pm 0.5$

Tabelle 4: *Rekonstruierte Massen und Breiten beobachteter Zerfallssignale. In den Ereignissen wurde mindestens ein Leptonkandidat mit hohem Transversalimpuls gefordert. Die von HERA-B angegebenen Fehler sind statistische Fehler.*

- Unter Verwendung des Elektron-Pretriggersystems wurden 600 000 Ereignisse mit großer transversaler Energie ( $E_T > 4$  GeV) im elektromagnetischen Kalorimeter aufgezeichnet. Diese Ereignisse enthalten harte Photonen, die entweder direkt erzeugt werden oder aus dem Zerfall neutraler Pionen stammen. Die Daten erlauben das Studium der Dynamik harter Proton-Kern-Stöße, beschreibbar durch perturbative QCD.
- Insgesamt wurden etwa  $4.5 \cdot 10^6$  Ereignisse mit mindestens einem Lepton-Kandidaten mit großem Transversalimpuls aufgezeichnet. Dabei kamen verschiedene Triggerkonfigurationen zum Einsatz, die die Elektron- und Myon-Pretrigger, die erste und die zweite Triggerstufe kombinierten. Die Daten besitzen eine angereicherte Charm-Komponente und können im Gegensatz zu  $J/\psi$ -Triggern auch zum Studium der Produktion und des Zerfalls von Teilchen mit Charm verwendet werden. Tabelle 4 zeigt rekonstruierte Zerfälle von Teilchen mit Charm oder Strangeness, die in diesen Ereignissen gefunden wurden.
- Der größte Teil der Datennahme widmete sich dem Dilepton-Trigger zur Selektion von Ereignissen mit  $J/\psi$ -Zerfällen. Insgesamt wurden mehr als  $18 \cdot 10^6$  Ereignisse aufgezeichnet. Dabei kamen sowohl das Elektron- als auch das Myon-Pretriggersystem zum Einsatz. Teile der Daten wurden allein auf Basis

der zweiten Triggerstufe selektiert. In der späteren Phase der Datennahme wurde auch die erste Triggerstufe verwendet, in der verlangt wurde, dass eine oder auch beide Leptonspuren erkannt wurden. Die so aufgezeichneten Daten sollten neben der Untersuchung der Charmonium-Produktion auch eine erste grobe Abschätzung des Beauty-Wirkungsquerschnitts in Proton-Kern-Stößen erlauben.

Die Datenanalyse ist noch nicht abgeschlossen. Hier werden exemplarisch einige vorläufige Resultate zur Physik schwerer Quarks dargestellt.

## Charm-Physik

Ereignisse mit schweren Quarks, insbesondere Charm-Quarks, werden durch das Triggern auf einzelne Leptonen mit großem Transversalimpuls angereichert. Bereits der kleine im Jahr 2000 genommene Datensatz offenbarte das große Potential von HERA-B in diesem Sektor. So gelang es nicht nur, ein sauberes Signal vom Zerfall  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  zu finden, sondern es wurden auch vollständig rekonstruierbare exklusive Zerfälle von D-Mesonen in hadronische Endzustände mit kleiner Multiplizität beobachtet. In Abbildung 47 sind die Signale für den Zerfall  $D^0 \rightarrow \pi^+ K^-$ , zusammen mit dem ladungskonjugierten Zerfall, deutlich im Massenspektrum zu erkennen.

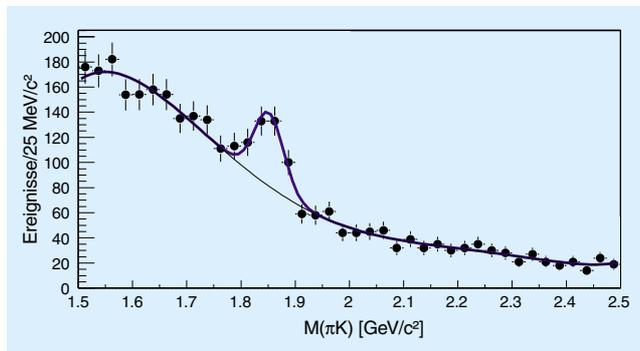


Abbildung 47: Spektren der invarianten Massen von  $\pi^\pm K^\mp$ -Kombinationen.

Zur Selektion dieser Zerfälle wurden die Zerfallsprodukte mit Hilfe des RICH-Detektors identifiziert. Ferner wurde unter Verwendung der Information vom Vertexdetektor ein vom Hauptvertex getrennter Sekundärvertex der potentiellen D-Zerfallsprodukte verlangt, und es wurde geprüft, ob der rekonstruierte Impulsvektor des D-Meson-Kandidaten vom Primärvertex zum Sekundärvertex zeigt.

Die Untersuchung der Zerfälle von Teilchen mit Charm in vollständig rekonstruierbare Endzustände wird in Zukunft einen hohen Stellenwert im HERA-B Programm einnehmen. Sie bietet exzellente Möglichkeiten zur Suche nach seltenen oder verbotenen Zerfällen von D-Mesonen in zwei Leptonen und dient somit zum Test des Standard-Modells.

## Charmonium-Physik

Charmonium-Zerfälle werden effizient durch die Dilepton-Trigger von HERA-B angereichert. Sowohl im elektronischen als auch im myonischen Zerfallskanal konnten klare  $J/\psi$ -Signale im Massenspektrum rekonstruiert werden.

In Abbildung 48 ist exemplarisch das  $\mu^+\mu^-$ -Massenspektrum nach der Standard-Rekonstruktion dargestellt. Die Ereignisse stammen aus den Datensätzen, die mit dem Dilepton-Trigger aufgenommen wurden. Zur zusätzlichen Untergrund-Unterdrückung wurde verlangt, dass mindestens eine Myonspur mit einem RICH-Ring assoziiert werden konnte. Deutlich sichtbar sind die Massensignale der  $J/\psi$ - und  $\psi'$ -Zustände.

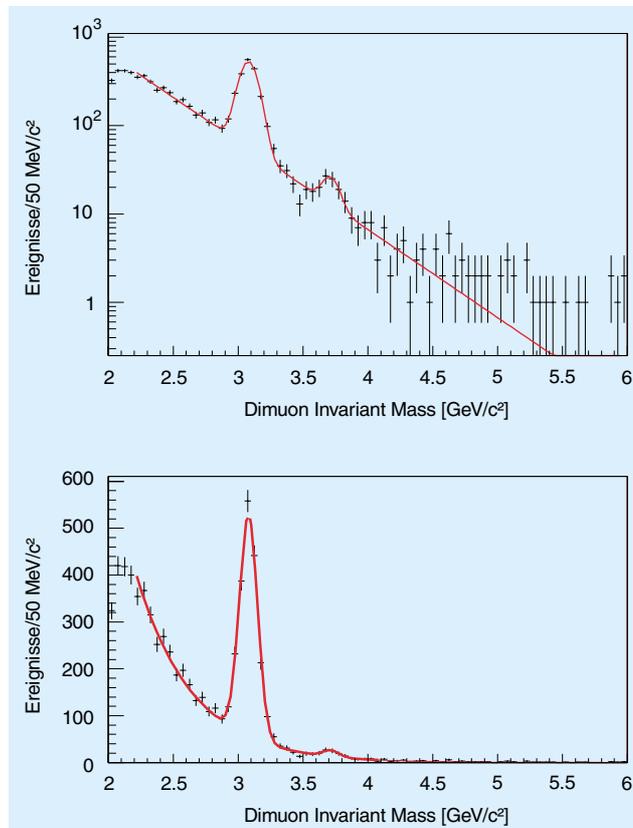


Abbildung 48: Massenspektrum der  $\mu^+\mu^-$ -Paare in logarithmischer und linearer Darstellung, zusammen mit einer Anpassungsfunktion, die im Wesentlichen aus zwei Gaußfunktionen (Signale) und einer Exponentialfunktion (Untergrund) besteht.

Die Anpassung durch zwei Gaußfunktionen, überlagert mit einem exponentiell abfallenden Untergrund, ergibt die Massen  $M_{J/\psi} = 3081 \text{ MeV}/c^2$  und  $M_{\psi'} = 3663 \text{ MeV}/c^2$ , die Breiten der Gauß-Anpassungen sind 70 bzw. 62  $\text{MeV}/c^2$ . Die jeweiligen Weltmittelwerte liegen bei 3097  $\text{MeV}/c^2$  und 3686  $\text{MeV}/c^2$ . Das Verhältnis der Produktionswirkungsquerschnitte von  $J/\psi$ - und  $\psi'$ -Zuständen beträgt etwa 50, in guter Übereinstimmung mit dem Wert von 60, der im Experiment E789 gemessen wurde.

## Beauty-Wirkungsquerschnitt

Die im Jahr 2000 gesammelten Daten zur  $J/\psi$ -Produktion erlauben eine erste Suche nach Zerfällen vom Typ

$B \rightarrow J/\psi X$ , um eine Grobmessung des Produktionswirkungsquerschnitts für  $b\bar{b}$ -Paare durchzuführen.

Verschiedene Ansätze werden bei der Datenanalyse verfolgt. Der direkteste besteht in der Rekonstruktion von signifikant vom Primärvertex getrennten Sekundärvertices, an denen auch das  $J/\psi$ -Meson entsteht und in zwei Leptonen zerfällt. Wegen der noch zu geringen Statistik im myonischen Kanal ist diese Methode bisher nur für den elektronischen Zerfallskanal der  $J/\psi$ -Mesonen anwendbar.

Ein zweiter Ansatz besteht in der Analyse doppelt-semileptonischer B-Zerfälle, die durch den Dilepton-Trigger effizient selektiert werden. Um Untergrundbeiträge zu beherrschen, muss in diesem Fall zusätzlich ein rekonstruierter Sekundärvertex vom Zerfall der bei den semileptonischen B-Zerfällen produzierten Charm-Teilchen, zum Beispiel mit drei geladenen Zerfallsprodukten, gefordert werden.

Für die Analyse der elektronischen  $J/\psi$ -Zerfälle wurden Selektionsschnitte angebracht, die in einem Datensatz von etwa 40 000  $J/\psi$ -Zerfällen resultieren. Der sehr große Untergrund unter diesem Signal (durch Drell-Yan-Paare und durch fälschlicherweise als Elektronen identifizierte Spuren, die nicht von Elektronen herrühren) kann reduziert werden, indem ein Mindestabstand zwischen Primär- und Sekundärvertex verlangt wird. Ferner können zusätzlich Bremsstrahlungs-Photonen der Elektronen verlangt werden, wodurch die verfügbare Statistik zwar um eine Größenordnung reduziert, das Signal aber auch drastisch gesäubert wird. Dies ist in Abbildung 49 demonstriert, in der das Spektrum der invarianten Massen der beiden Elektronen mit Bremsstrahlungs-Photonen dargestellt ist. Von beiden Spuren wird verlangt, dass sie aus einem gemeinsamen Vertex stammen.

Die entsprechende Analyse der myonischen  $J/\psi$ -Zerfälle leidet noch an zu geringer Statistik. Das Gleiche gilt für die Analyse der doppelt-semileptonischen Beauty-Zerfälle mit rekonstruiertem Vertex des sekundären Charm-Zerfalls.

Die Resultate zeigen insgesamt, dass eine genaue Messung des Beauty-Produktionswirkungsquerschnitts mit einem verbesserten HERA-B Detektor in der nächsten Datennahmeperiode möglich sein wird.

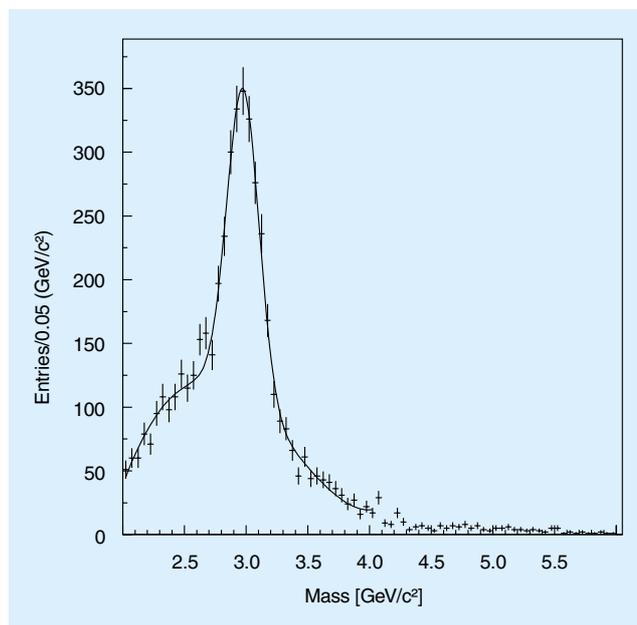


Abbildung 49: Spektrum der invarianten Massen der beiden Elektronen aus dem gesäuberten Dilepton-Datensatz.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Jahr 2000 war für HERA-B das erste Jahr, in dem das komplett fertig gestellte Experiment betrieben werden konnte. Eine große Zahl der Komponenten des HERA-B Experiments arbeitete hierbei zur vollen Zufriedenheit und erreichte die geplanten Leistungsdaten. Leider erfüllte sich die Hoffnung nicht, das Experiment als Ganzes ebenfalls in sehr kurzer Zeit auf dieses hohe Niveau zu bringen. Durch seine außerordentliche Komplexität wurden mehrere Probleme erst in dieser späten Phase, in der das gesamte System betrieben wurde und alle Komponenten zusammenspielten, sichtbar. Hier sind vor allem die gasgefüllten Spurdetektoren zu nennen, bei denen noch nicht die geplante Effizienz und Stabilität erreicht werden konnte. Hierdurch wurde vor allem die erste Triggerstufe (FLT), die sehr hohe Anforderungen an die Effizienz der Spurdetektoren stellt, in Mitleidenschaft gezogen. Ihre Inbetriebnahme wurde hierdurch erheblich erschwert. Die ursprüngliche Zielsetzung von HERA-B, die Messung der CP-Verletzung bei Beauty-Quarks, wurde dadurch

verzögert. In der Zwischenzeit haben die eigens für diese Fragestellung gebauten B-Meson-Fabriken in den USA und Japan ihren Betrieb erfolgreich aufgenommen. Deshalb hat die HERA-B Kollaboration ein Physikprogramm – Untersuchungen von QCD und Charm-Zuständen – für die Zeit 2001–2002 vorgeschlagen, das vom DESY-Direktorium genehmigt wurde.

Auch wenn HERA-B seine hochgesteckten Ziele bisher nicht erreichen konnte, ist es bereits jetzt das leistungsfähigste Vielteilchen-Spektrometer, das jemals für diesen Energiebereich gebaut wurde. Es erlaubt bei weitem

höhere Datenraten und überdeckt einen deutlich größeren Bereich der Zerfallskinetik der produzierten Teilchen als alle bisherigen Fixed-Target Experimente bei CERN und Fermilab. Es darf daher erwartet werden, dass HERA-B auch bei reduzierter Leistungsfähigkeit in der Lage sein wird, interessante Beiträge im Bereich der QCD- und Charm-Physik zu liefern und zu einem tieferen Verständnis der starken Wechselwirkung beizutragen. Zudem wird HERA-B seine Vorreiterrolle bei den Hochraten-Experimenten weiter ausbauen können und wichtige Erkenntnisse für zukünftige Detektor-Generationen liefern.

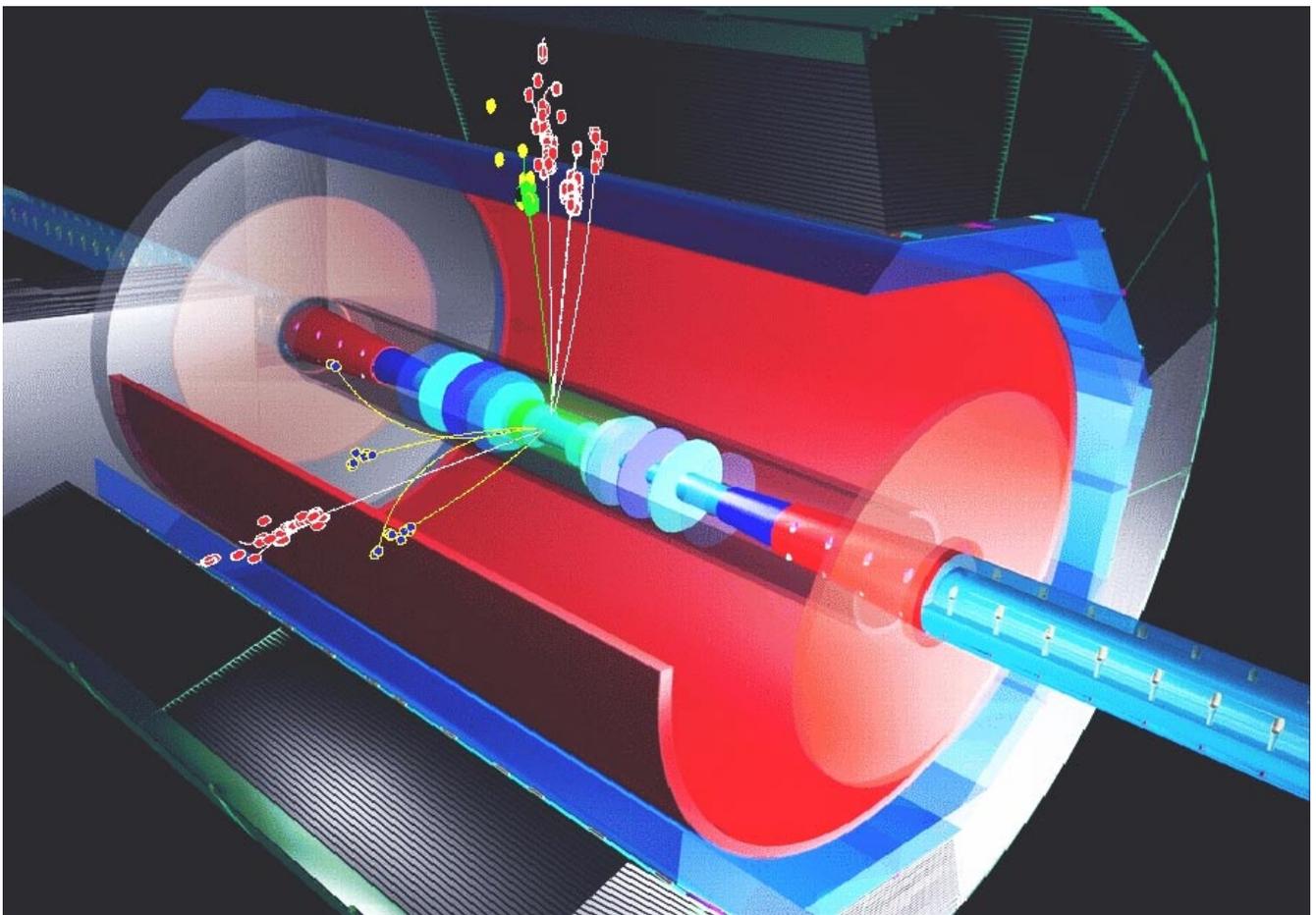


Abbildung 50: Perspektivische Ansicht des TESLA-Detektors mit einem Ereignis im Detektor.

# 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

**Das Jahr 2000 stand ganz im Zeichen der Vorbereitung des „Technical Design Reports“ für TESLA (TDR), der im März des Jahres 2001 veröffentlicht worden ist. Die Arbeiten hierzu finden seit 1998 im Rahmen der internationalen II. ECFA/DESY Studie statt (ECFA – European Committee for Future Accelerators). In zwei Konferenzen, eine davon am DESY, wurden die Ergebnisse der Arbeitsgruppen vorgestellt und diskutiert.**

**Im September 2000 nahmen Mitglieder der Gruppe FLC an der internationalen LCWS 2000 Konferenz am Fermilab in den USA teil, auf der Physik und Technik zukünftiger Linearbeschleuniger wie TESLA besprochen wurden.**

**Im Berichtsjahr sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine Spurkammer und für Kalorimeter bei TESLA intensiv verfolgt worden.**

## Physik am Linear-Collider TESLA

Das Standard-Modell der Teilchenphysik ist eine außerordentlich erfolgreiche Theorie, die die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen beschreibt. In den letzten dreißig Jahren sind in diesem Bereich enorme Fortschritte gemacht worden. Quarks und Leptonen als fundamentale Bausteine der Materie konnten etabliert werden, und die Natur der Kräfte konnte auf ein solides theoretisches Fundament gestellt werden. Viele Aspekte der Theorie konnten in einer langen Serie von Experimenten an Lepton- und Hadronbeschleunigern erfolgreich getestet werden.

Die Theorie weist aber nach wie vor entscheidende Lücken auf. So ist es bisher nicht gelungen, zu verstehen, wie die Massen der beobachteten Teilchen zu erklären sind – sowohl die Tatsache an sich, dass sie eine Masse haben, aber auch die sehr großen Unterschiede in der Masse vom leichtesten Quark, dem up-Quark, zum schwersten, dem top-Quark, sind unverstanden.

Obwohl mit der QCD eine Theorie der starken Wechselwirkung etabliert werden konnte, ist es bis heute nicht gelungen, diese mit der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung zu vereinigen. Vielleicht am deutlichsten wird die Unvollkommenheit der Theorie aber dadurch illustriert, dass die Kraft, die in der Natur am sichtbarsten ist, die Gravitation, bisher überhaupt nicht in das Bild hineinzupassen scheint.

Einer der wesentlichen Schritte auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis der Natur ist die Entdeckung des Higgs-Teilchens – ein Teilchen, das im Standard-Modell eng mit der Frage der Masse verbunden ist. Bisher konnte das Higgs-Teilchen experimentell nicht nachgewiesen werden, obwohl es interessante erste Hinweise in Daten von Experimenten am LEP-Beschleuniger gibt. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird das Higgs-Teilchen bei einer Masse von weniger als 200 GeV erwartet. Die Beobachtung, aber auch die Nicht-Beobachtung dieses Teilchens wird entscheidende Informationen über das Standard-Modell liefern.

Die präzise Untersuchung der Eigenschaften bekannter Teilchen hat in der Vergangenheit entscheidend zum Verständnis der Physik der Elementarteilchen beigetragen. Eine exakte Untersuchung des top-Quarks und, falls es existiert, des Higgs-Teilchens, wird helfen, in

der Zukunft Informationen über Physik bei sehr hohen Energien zu bekommen, die weit jenseits der Bereiche liegen, die mit Beschleunigern unmittelbar erreicht werden können.

TESLA (TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator) wird in der Lage sein, bei der Aufklärung dieser fundamentalen Fragen entscheidend mitzuwirken. Zusammen mit den anderen Beschleunigern der nächsten Generation, wie dem Tevatron-II oder dem LHC, wird TESLA die Frage des Higgs-Teilchens im Standard-Modell beantworten können. Wenn es das Higgs gibt, wird TESLA seine Eigenschaften mit unerreichter Genauigkeit bestimmen können. Selbst wenn – was zu erwarten ist – das Higgs bereits am Tevatron oder am LHC entdeckt worden ist, bevor TESLA erste Daten nimmt, wird es TESLA vorbehalten sein, zu etablieren, dass es sich bei dem Teilchen tatsächlich um das Higgs handelt, und ob es in den Rahmen des Standard-Modells hineinpasst.

Die Entdeckung und genaue Vermessung des Higgs-Teilchens bedeuten allerdings nicht, dass damit alle Fragen der Teilchenphysik geklärt sind. Das Standard-Modell ist auf viel zu viele ad-hoc Annahmen gegründet und lässt zu viele Fragen offen, als dass es eine wirklich fundamentale Theorie sein kann. Sehr grundlegende theoretische Überlegungen liefern die Argumente, dass es eine weiterführende Theorie geben muss. Ein mögliches Konzept ist das der Supersymmetrie. In supersymmetrischen Theorien wird die scheinbar sehr unterschiedliche Behandlung von Fermionen und Bosonen aufgehoben, indem jedem Fermion ein Boson zugeordnet ist und umgekehrt. Solch eine Theorie hat viele sehr attraktive Eigenschaften – experimentell ist sie bisher allerdings nicht bestätigt.

Eine unmittelbare Konsequenz der Supersymmetrie ist es, dass eine große Zahl neuer Teilchen existieren sollte. Unterschiede zwischen verschiedenen supersymmetrischen Theorien spiegeln sich in den Massen dieser Teilchen wider. Sollte es Supersymmetrie geben, wäre es wichtig, möglichst viele dieser Teilchen möglichst genau zu vermessen, um zu verstehen, in welcher Form die Supersymmetrie in der Natur realisiert ist. Die meisten der Theorien sagen viele Teilchen mit Massen unterhalb eines TeV voraus, in einem Bereich also, der mit einer Maschine wie TESLA zugänglich ist. Verglichen mit einem Hadron-Beschleuniger wie dem LHC kann TESLA in einem weiten Para-

meterraum im Wesentlichen alle der vorausgesagten supersymmetrischen Teilchen mit großer Präzision untersuchen, allerdings ist der Bereich sehr hoher Massen, oberhalb etwa 1 TeV, dem direkten Zugriff von TESLA verschlossen.

Supersymmetrie ist eine Theorie, die den Weg zu einer Beschreibung der Gravitation im Rahmen einer Quantentheorie öffnet. Die Entdeckung von Supersymmetrie kann zwar nicht als Garantie dafür gelten, dass die Gravitation damit auch verstanden werden kann, umgekehrt scheinen aber alle bisher untersuchten und erfolgversprechenden Ansätze einer Quantentheorie der Gravitation die Supersymmetrie zu fordern. Die Entdeckung und genaue Vermessung der supersymmetrischen Teilchen kann deshalb ein einmaliges Fenster bieten, Informationen über die Physik, die bei für die Gravitation relevanten Energien von etwa  $10^{16}$  GeV gilt, zu gewinnen. Eventuell ist dies der einzige Weg, da Beschleuniger mit solch hohen Energien nur schwer vorstellbar sind.

Ein zentraler Aspekt der Physik bei TESLA ist die hohe Präzision. Ein tiefes Verständnis der Physik der elementaren Teilchen setzt nicht nur voraus, dass Teilchen gefunden werden, sondern dass ihre Eigenschaften, ihre Wechselwirkungen untereinander und mit anderen Teilchen mit hoher Präzision vermessen werden können. Nur dann kann überprüft werden, wie weit die Beschreibung im Rahmen des Standard-Modells gültig ist, oder ob irgendwann neue Phänomene auftreten, die neue theoretische Ansätze notwendig machen. Elektron-Positron Beschleuniger wie TESLA spielen hier eine sehr zentrale Rolle. Aufgrund des eindeutig definierten Anfangszustandes und der genau definierten Energie der Kollision sind Präzisionsmessungen überhaupt erst möglich. Viele der interessanten Prozesse treten nur sehr selten auf, und nur die fast untergrundfreie Umgebung eines Elektron-Positron Beschleunigers erlaubt einen experimentellen Zugang.

Natürlich kann es sein, dass keine der Vorstellungen, die wir heute haben, in der Natur verwirklicht ist. Vielleicht gibt es kein Higgs, vielleicht ist Supersymmetrie nur ein Traum, und vielleicht gibt es keine neuen Teilchen bei den Energien, die von der nächsten Generation der Beschleuniger untersucht werden. In diesem Fall werden Präzisionsmessungen bei möglichst hohen Energien die einzige Möglichkeit sein, zu entscheiden, welches der verschiedenen theoretischen Modelle stimmt.

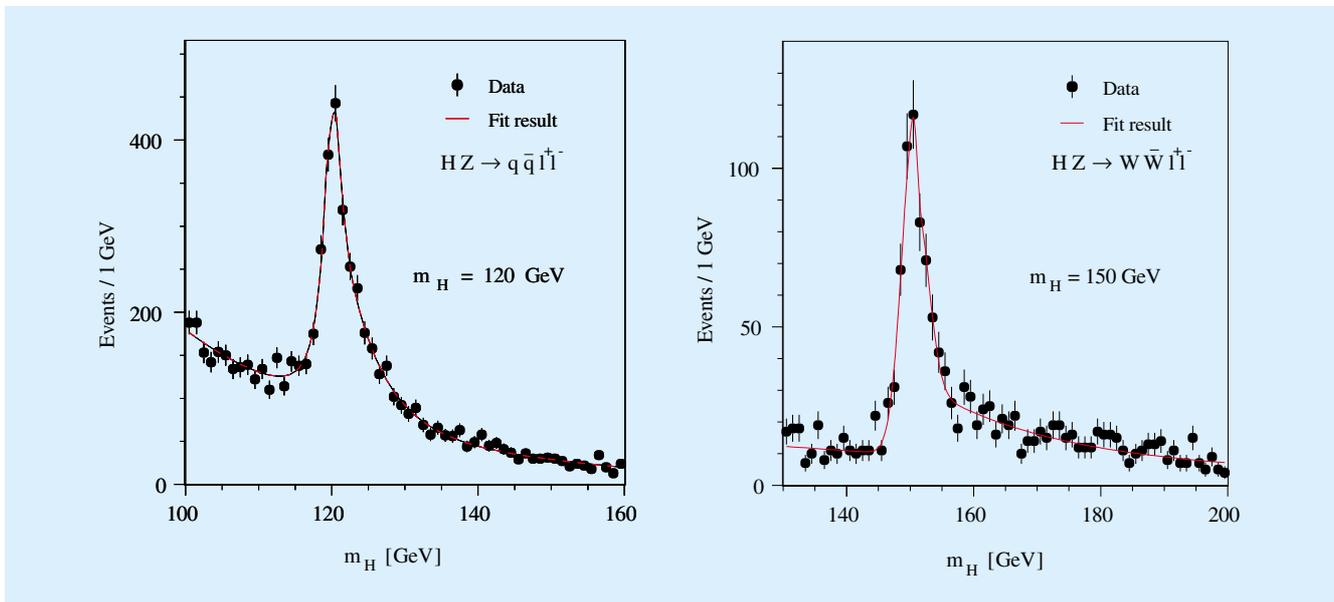


Abbildung 51: *Simuliertes Higgs-Signal im Higgs-Strahlungs-Prozess,  $e^+e^- \rightarrow H^0 Z^0$ .*

Ein Elektron-Positron Linear-Collider ist das ideale Werkzeug, um all diese verschiedenen Fragen anzugehen, und – hoffentlich – zu beantworten. Zusammen mit den schon im Bau befindlichen Maschinen wird TESLA uns einen entscheidenden Schritt im Verständnis der mikroskopischen Natur weiterbringen.

## Studien zum Physikpotenzial von TESLA

Die Untersuchungen des Physikpotenzials von TESLA als Elektron-Positron- und Photon-Photon-Collider finden in enger Zusammenarbeit mit Gruppen aus der theoretischen Physik sowie mit zahlreichen deutschen und internationalen Instituten statt (engere Verbindungen bestehen zum Beispiel mit der Ecole Polytechnique, Paris, mit der Universität Lund, der Universität Ottawa und dem ITEP, Moskau). Insbesondere besteht eine enge Verbindung zur Universität Hamburg. Das Projekt TESLA erfreut sich dabei bei Hamburger Studenten einer großen Attraktivität – im Berichtsjahr arbeiteten bis zu 16 Studenten an Studien zu TESLA. Die Gruppe profitiert sehr von der Beteiligung am OPAL-Experiment am LEP-Beschleuniger, wodurch viele der Machbarkeitsstudien für TESLA durch entsprechende Aus-

wertung realer Elektron-Positron-Daten untermauert werden können.

Im Technical Design Report (TDR) werden die physikalischen Fragen der Teilchenphysik bei TESLA in folgende vier Themenkreise gegliedert:

- Higgs-Bosonen,
- Supersymmetrie,
- Alternative Theorien,
- Präzisionsmessungen des Standard-Modells.

Einige wichtige und neuere Studien werden im Folgenden kurz erläutert.

Die Messung der Eigenschaften des Higgs-Bosons ist von fundamentaler Bedeutung zur Erklärung der beobachteten Brechung der elektroschwachen Symmetrie. Diese Eigenschaften sind die Masse, seine Quantenzahlen (Spin und CP), seine totale Zerfallsbreite, die Stärke der Kopplung des Higgs-Bosons an Eichbosonen und Fermionen und seine Selbstkopplung. Diese Eigenschaften lassen sich mit TESLA anhand einer großen Zahl unterschiedlicher Messungen bestimmen. Der große Vorteil von TESLA im Vergleich zu Hadron-Collidern wie dem LHC liegt vor allem im modellunabhängigen Nachweis des Higgs-Bosons (man kann

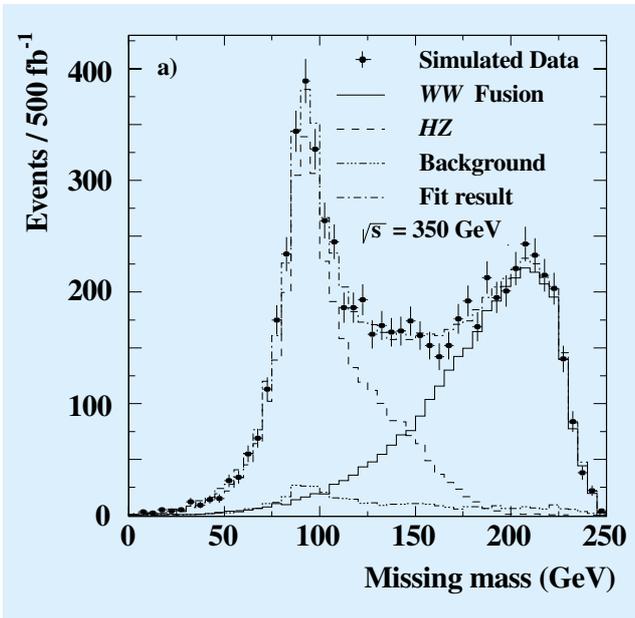


Abbildung 52: Selektion von Higgs-Bosonen aus dem WW-Fusions-Prozess. Das Signal (durchgezogene Linie) wurde für eine Higgs-Masse von 120 GeV errechnet.

es im sogenannten Higgs-Strahlungs-Prozess anhand eines gleichzeitig produzierten  $Z^0$ -Bosons erkennen), und in der hohen Effizienz für praktisch alle möglichen Higgs-Zerfälle. Die Simulation eines Higgs-Boson-Signals im Higgs-Strahlungs-Prozess für zwei unterschiedliche Higgs-Massen ist in Abbildung 51 gezeigt. Aus diesen Verteilungen lässt sich die Higgs-Masse mit einer Präzision von etwa einem halben Promille bestimmen. Aus der beobachteten Rate für diesen Prozess bestimmt man die Kopplung des Higgs-Bosons an das  $Z^0$  mit einer Genauigkeit von etwa zwei Prozent nach ein bis zwei Jahren TESLA-Laufzeit.

Eine neue Studie beschäftigt sich mit dem Prozess der WW-Fusion von Higgs-Bosonen. Bei größeren Higgs-Massen bekommt die Produktion von Higgs-Bosonen in diesem Prozess eine große Bedeutung. Es wurde gezeigt, dass der Wirkungsquerschnitt für diesen Prozess mit hoher Präzision bestimmt werden kann. In Abbildung 52 ist eine Simulation dieses Prozesses gezeigt.

Diese Messung ist für die indirekte Bestimmung der totalen Zerfallsbreite des Higgs-Bosons von Bedeutung und kann darüber hinaus die Extraktion der Higgs-

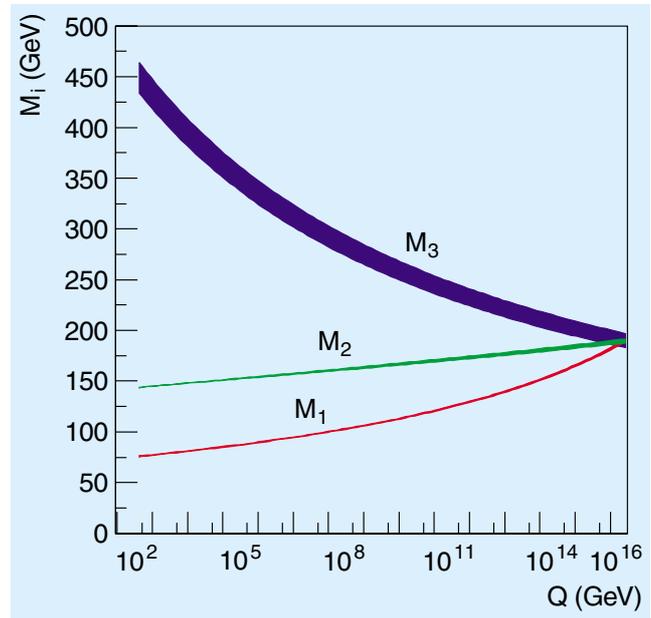


Abbildung 53: Extrapolation der bei TESLA ( $M_1$ ,  $M_2$ ) und dem LHC ( $M_3$ ) bestimmbaren Massenparameter der supersymmetrischen Partner der Eichbosonen. Die Hypothese einer Vereinheitlichung bei Energien oberhalb von  $10^{15}$  GeV kann getestet werden.  $M_1$ ,  $M_2$  und  $M_3$  sind Parameter, die mit den Massen der supersymmetrischen Partner der Eichbosonen verknüpft sind.

Kopplungen aus der Messung von Verzweigungsverhältnissen und anderen Produktionsquerschnitten deutlich verbessern. Mittels einer globalen Anpassung der bei TESLA möglichen Messungen lassen sich alle wesentlichen Kopplungen an Fermionen und Bosonen auf dem Prozentniveau bestimmen. Dieses Gesamtbild stellt einen hochempfindlichen Test des Mechanismus der elektroschwachen Symmetriebrechung dar und erlaubt es, unterschiedliche Realisierungen dieses Mechanismus, zum Beispiel supersymmetrische, zu unterscheiden.

Eine weitere in Hamburg durchgeführte Studie befasst sich mit der Sensitivität auf Verletzung der Teilchen-Anteilchen-Symmetrie (CP) in der Produktion von Higgs-Bosonen. Mithilfe einer empfindlichen Methode ist es möglich, solche CP-verletzenden Beiträge auf dem Prozentniveau zu vermessen bzw. auszuschließen.

Supersymmetrie, eine der am besten motivierten Erweiterungen des Standard-Modells, stellt möglicherweise

den Schlüssel zu einer Vereinheitlichung aller Kräfte bei extrem hohen Energien dar. Nur die präzise Vermessung der Massen und Kopplungen der bei TESLA zugänglichen supersymmetrischen Teilchen erlaubt eine Überprüfung dieser Vereinheitlichungs-Hypothese.

Diese Überprüfung basiert auf der Extrapolation der Messungen bei TESLA und beim LHC über viele Größenordnungen hinweg. Eine solche Extrapolation ist in Abbildung 53 gezeigt. Erst die sehr genaue Bestimmung von Parametern, wie sie mit TESLA möglich ist (die mit  $M_1$  bzw.  $M_2$  bezeichneten Kurven in Abb. 53), erlaubt es, eine Aussage über die Gültigkeit spezifischer Modelle zu machen. Dies zeigt, wie durch die in Elektron-Positron-Kollisionen erreichbare Präzision ein Fenster für Physik weit oberhalb der tatsächlich verfügbaren Energie geöffnet wird.

Eine grundlegende Vorhersage des Standard-Modells ist die Selbstwechselwirkung der schweren Eichbosonen  $W^\pm$  und  $Z^0$ . Diese Kopplungen können bei TESLA mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Insbesondere wird durch die große Anzahl von Ereignissen und durch die Möglichkeit, die Elektronen- bzw. Positronenstrahlen zu polarisieren, eine simultane Untersuchung aller Parameter zur Beschreibung anomaler Kopplungen möglich. Die Sensitivität liegt im Subpromille-Bereich und ist damit deutlich größer als beim LHC. Anomale Kopplungen sind Beispiele für sehr empfindliche Observablen, mit deren Hilfe nach Physik jenseits des Standard-Modells in Massenbereichen gesucht werden kann, die weit über die am Beschleuniger direkt erreichbaren Energien hinausgehen.

Die genaue Untersuchung des schwersten bekannten Quarks, des top-Quarks, das bei Schwerpunktsenergien oberhalb von etwa 350 GeV paarweise produziert werden kann, stellt einen weiteren wichtigen Bereich dar, der mit TESLA erschlossen werden kann. Die Studien haben gezeigt, dass sich die top-Masse auf 100 MeV genau durch Messung des Wirkungsquerschnitts nahe der Produktionsschwelle bestimmen lässt (Abb. 54). Des Weiteren lassen sich aus der Messung der Zerfallswinkelverteilungen des top-Quarks sein elektrisches und magnetisches Dipolmoment sowie mögliche CP-verletzende Effekte untersuchen. Damit wird das top-Quark zu dem am genauesten vermessenen Quark. Damit wird es eine entscheidende Rolle in der Überprüfung der Konsistenz des Standard-

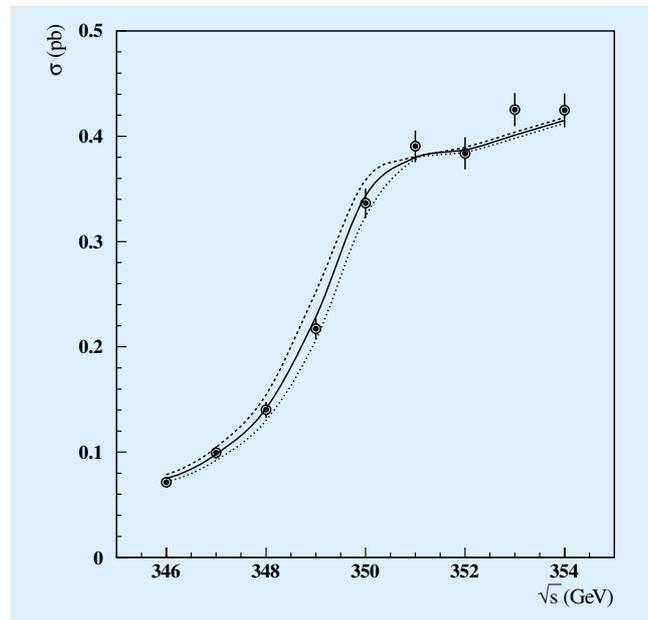


Abbildung 54: Simulation der Bestimmung der Masse des top-Quarks aus dem Schwellenverhalten des Wirkungsquerschnitts für top-Paarproduktion.

Modells und in der Suche nach Abweichungen vom Standard-Modell spielen.

Zwei weitere Optionen für den TESLA Beschleuniger wurden im Berichtsjahr untersucht:

- Giga-Z: der Betrieb von TESLA auf der Z-Resonanz mit einer Produktionsrate von  $10^9$  Z-Bosonen in 50–100 Tagen, etwa der 1000-fachen des LEP-Beschleunigers.
- $\gamma\gamma$ -Option: der Betrieb von TESLA als Photon-Photon-Collider durch Compton Streuung von Laserlicht am Elektronen-Strahl.

Mit Giga-Z lassen sich viele der LEP-Präzisionsmessungen deutlich verbessern. Insbesondere in einer Situation, in der bei hoher Energie „nur“ ein Higgs-Boson und keine weiteren Teilchen beobachtet werden, erlaubt eine verbesserte Messung des elektroschwachen Mischungswinkels bei Giga-Z in Verbindung mit einer verbesserten Messung der Massen von W-Boson und top-Quark eine indirekte Vorhersage der Higgs-Masse mit 5% Präzision. Diese kann dann mit der direkten Messung bei hoher Energie konfrontiert werden. Abweichungen der beiden Massenbestimmungen wären richtungweisend für jegliche Art neuer Physik.

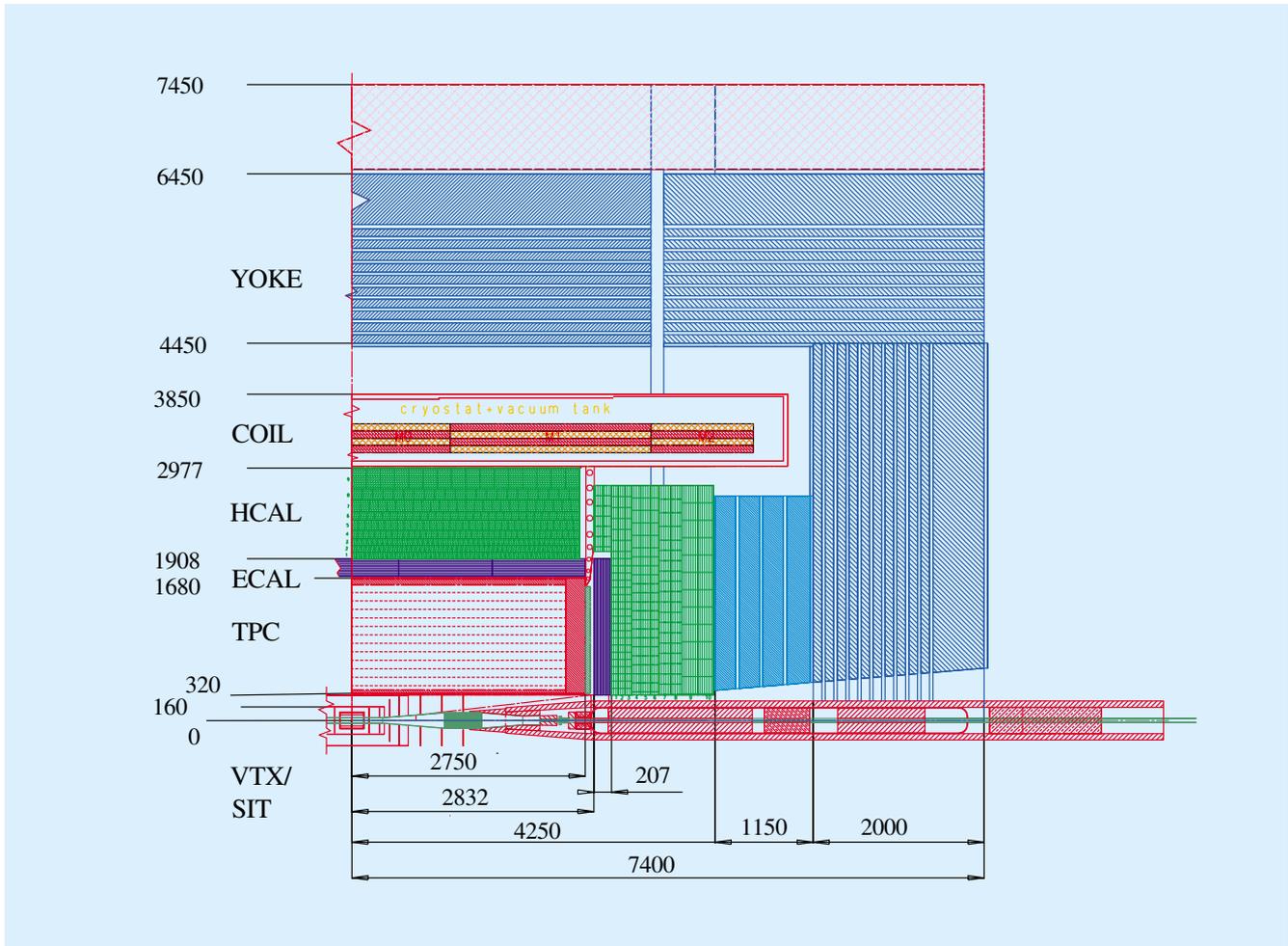


Abbildung 55: Ansicht eines Viertels eines Detektors für TESLA.

Der Untersuchung der  $\gamma\gamma$ -Option war der „International Workshop on High Energy Photon Colliders“ gewidmet, der im Juni 2000 am DESY stattfand. Das Physikpotenzial dieser Option ist ebenfalls im TDR dargestellt. Ein Vorteil gegenüber Elektron-Positron-Kollisionen besteht in der Möglichkeit, Higgs-Bosonen resonant zu erzeugen. Dies ermöglicht die Bestimmung der effektiven Higgs-Photon-Kopplung mit deutlich größerer Präzision als in Elektron-Positron-Kollisionen. Darüber hinaus ist die Produktion schwerer supersymmetrischer Higgs-Bosonen bis zu Massen dicht an der Schwerpunktsenergie des Beschleunigers möglich.

Mit der rechtzeitigen Fertigstellung der Studien für den TESLA TDR zum März 2001 wurde die physikalische Motivation von TESLA als nächstes großes In-

strument zur Erforschung der Mikrophysik umfassend dokumentiert.

## Detektorstudien

TESLA stellt ganz besondere Anforderungen an einen Detektor für die Teilchenphysik, die sich deutlich von denen für einen Detektor an einer Hadron-Maschine, wie zum Beispiel dem LHC oder auch HERA, unterscheiden. An einer Lepton-Maschine ist der Anteil von Untergrund-Ereignissen deutlich geringer, und die Ereignisse haben eine einfachere Struktur. Beides zusammen ermöglicht es, erheblich mehr Informationen aus den einzelnen Ereignissen zu extrahieren und alle physikalisch interessanten Ereignisse aufzuzeichnen.

Technisch heißt das, dass ein Detektor daraufhin optimiert werden muss, die physikalischen Ereignisse präzise zu vermessen, weniger daraufhin, den Untergrund zu verstehen und zu tolerieren.

Das Detektorkonzept, das für TESLA gewählt wurde, ist das eines „großen Detektors“, in dem die Rekonstruktion der Spuren in einem großen Volumen stattfindet, und damit der gesamte Detektor entsprechend große Ausmaße bekommt. Außerhalb der Spurkammersysteme sind Kalorimeter mit sehr guter Ortsauflösung angeordnet. Sowohl die Spurkammersysteme als auch die Kalorimeter befinden sich in einem magnetischen Feld von 4 T. Außerhalb der Spule, die als supraleitende Spule ausgeführt ist, schließt ein Eisenjoch den magnetischen Fluss. Es ist mit mehreren Lagen von Detektoren für Myonen ausgestattet. Spezielle Detektorelemente sorgen dafür, dass der Nachweis von Teilchen bis hin zu sehr kleinen Winkeln zum Strahl möglich ist. Ein Querschnitt durch den Detektor ist in Abbildung 55 gezeigt.

Beim LHC spielt die Strahlenhärte der verschiedenen Detektorkomponenten eine sehr wichtige Rolle, die manchmal sogar entscheidend für die Wahl der Technologie ist. Dies ist bei TESLA nicht der Fall. Untergrund und damit Strahlenbelastungen sind relativ gering und stellen in der Regel kein wesentliches Problem dar.

Die Detektorarbeiten, die unter Beteiligung des DESY stattgefunden haben, berühren im Wesentlichen alle Detektorteile innerhalb der Spule: Spurdetektoren, Kalorimeter und Instrumentierung in der Vorwärtsrichtung.

### Der zentrale Spurdetektor

Der zentrale Spurdetektor bei TESLA hat zwei wesentliche Komponenten: eine großvolumige „Time Projection Chamber“ (TPC) und ein System hochpräziser Silizium-Detektoren innerhalb der TPC bis unmittelbar an den Wechselwirkungspunkt. Aufgabe der Spurkammern ist es, Spuren geladener Teilchen mit hoher Präzision zu vermessen, die Zerfallsvertices langlebiger Teilchen zu rekonstruieren und einen Beitrag zur Teilchenidentifikation mittels der Messung des spezifischen Energieverlustes,  $dE/dx$ , zu leisten. Neben der Auflösung ist ein weiteres wichtiges Design-Kriterium, dass das gesamte System an Spurkammern aus möglichst wenig Material bestehen sollte, so dass die zu

vermessenden Teilchen wenig durch Wechselwirkung mit dem Material beeinflusst werden. Der voluminmäßig größte Teildetektor des inneren Spurdetektorsystems ist die TPC. Sie hat einen inneren 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. Eine der wesentlichen neuen Entwicklungen für eine TPC bei TESLA ist die Art der Auslese. Bisher sind dort Drahtkammern zum Einsatz gelangt, in denen die im TPC-Volumen erzeugte Ladung verstärkt und dann mittels hinter den Drähten angeordneten Elektroden („Pads“) nachgewiesen wird. In den letzten Jahren hat die Entwicklung leistungsfähiger Gas-Mikrodetektoren andere Optionen ermöglicht. In Hamburg wird untersucht, ob GEM- („Gas Electron Multiplier“-)Folien für eine TPC-Auslese geeignet sind. GEMs versprechen, eine Endplatte bauen zu können, die eine bessere Auflösung ermöglicht bei gleichzeitig geringeren systematischen Effekten durch Feldverzerrungen und weniger Material. Eine Test-TPC mit GEM-Auslese ist in Hamburg aufgebaut worden und wird seit etwa einem Jahr stabil betrieben.

In Abbildung 56 ist der Zusammenhang zwischen der angelegten Verstärkungsspannung und der Gasverstärkung zu sehen. Die Sättigung bei hohen Spannungen

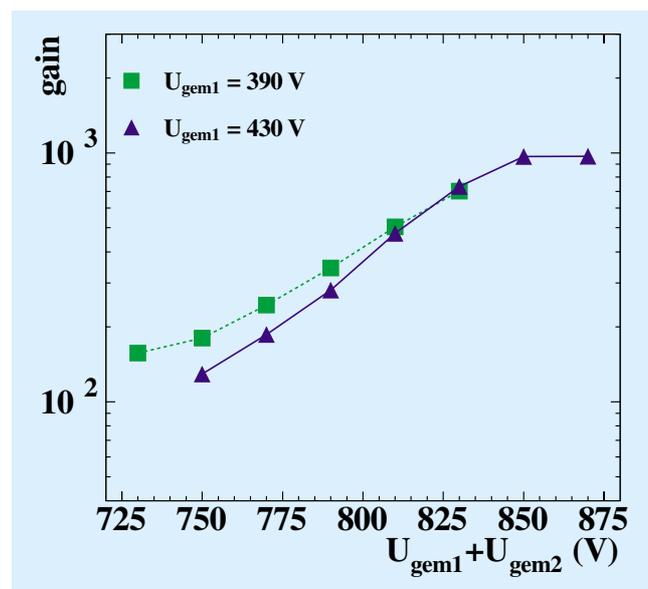


Abbildung 56: Abhängigkeit der Gasverstärkung in einer 2-fach GEM Struktur von den angelegten Spannungen.

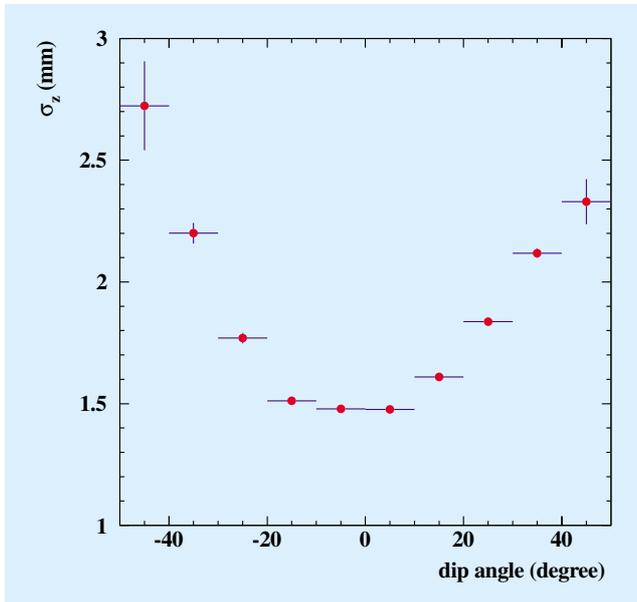


Abbildung 57: Gemessene  $z$ -Auflösung in der TPC als Funktion des Winkels zwischen Spur und Elektron-Driftrichtung.

ist ein Ergebnis der Ausleseelektronik. Eine Verstärkung von etwa 1000 ist erreicht worden, ausreichend für einen stabilen Betrieb der Kammer. Für einen Betrieb in einem realistischen Experiment ist eine etwas höhere Verstärkung angestrebt.

Die Ortsauflösung entlang der Elektron-Driftrichtung ( $z$ ) in der TPC wurde mit kosmischen Myonen bestimmt. Sie ist in Abbildung 57 gezeigt, als Funktion des Winkels zwischen der Spur und der Elektron-Driftrichtung. Der Wert von etwa 1.5 mm bei senkrechtem Einfall ist mit den theoretischen Erwartungen aufgrund der Diffusion der Elektronen im Gas und der Zeitauflösung der Elektronik in Übereinstimmung.

Ein interessantes technisches Problem ist es, wie die intrinsisch hohe Granularität der GEM-Folien genutzt werden kann, ohne dass die Zahl der Auslesekanäle extrem groß wird. Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass eine Möglichkeit der Einsatz komplizierterer Auslesegeometrien ist, in denen Pads in einer Art und Weise angeordnet und geformt sind, dass die Verteilung von Ladung auf verschiedene Pads optimiert wird. In Simulationen konnte damit eine Punktauflösung von 100 bis 150  $\mu\text{m}$  erreicht werden, fast unabhängig von der Drift-

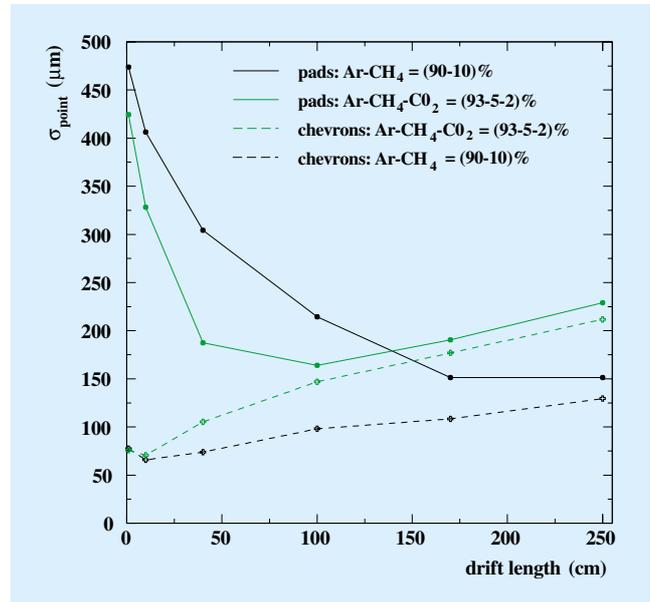


Abbildung 58: Simulierte  $r$ - $\phi$  Auflösung in einer GEM-TPC, für normale rechteckige Ausleseelektroden („Pads“), und für eine kompliziertere Elektrodengeometrie („Chevron Pads“). Die Anzahl der Kanäle ist für beide Geometrien gleich.

strecke. Dieses Konzept soll in den nächsten Monaten experimentell überprüft werden (Abb. 58).

Für den TDR ist ein erstes technisches Design entwickelt worden, wie eine TPC mit GEM-Auslese realisiert werden kann. Die Grundeinheit dabei ist ein sogenannter „GEM Tower“, in dem zwei GEMs zur Gasverstärkung und eine GEM zur Unterdrückung des Ionenrückflusses kombiniert sind. Ein GEM Tower erreicht eine Höhe von etwa 2 cm. Die gesamte Endplatte soll aus etwa 40 solcher Türme aufgebaut werden. Am DESY wird zur Zeit ein erster Prototyp eines solchen GEM Towers gebaut, der dann in der Test-TPC betrieben werden soll.

Erhebliche Anstrengungen wurden im Jahr 2000 unternommen, um eine realistische Rekonstruktion von Ereignissen im vorgeschlagenen Spurdetektorsystem zu ermöglichen. Dies ist wichtig, um die Leistungsfähigkeit des Detektors zu demonstrieren und um zu zeigen, ob das Design den sehr hohen Anforderungen der physikalischen Analysen gerecht wird. In Abbildung 59 ist die erreichte Effizienz gezeigt, mit der Spuren im ge-

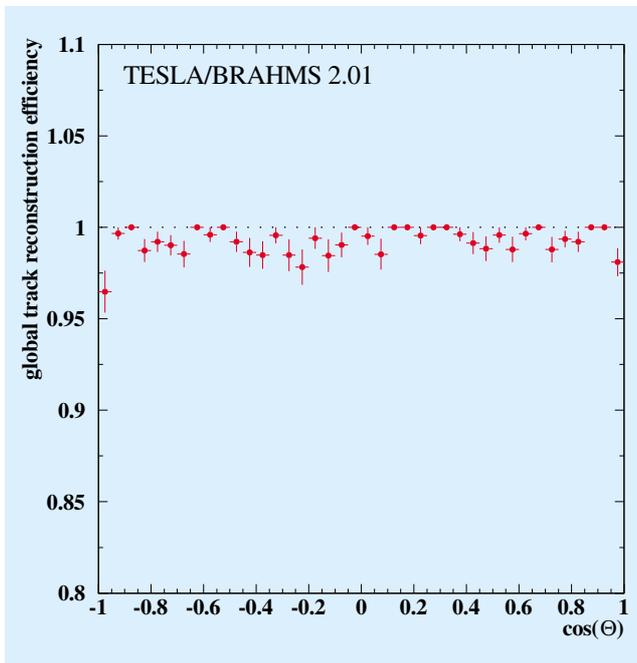


Abbildung 59: Simulierte Spurrekonstruktionseffizienz im zentralen Spurrückbau-System des TESLA-Detektors, als Funktion des Winkels zwischen Spur und Strahlachse.

samt System gefunden und rekonstruiert werden können. Eine mittlere Rekonstruktionseffizienz von über 99% wurde in hadronischen  $Z$ -Zerfällen erreicht.

## Die Kalorimeter

Für viele der Messungen, die bei TESLA gemacht werden sollen, werden komplexe hadronische Endzustände vorausgesagt. Häufig werden diese in mehrstufigen Kaskadenzerfällen entstehen. Um neue Physik zu erkennen, müssen deren Signaturen von denen typischer Standard-Modell Prozesse wie  $t \rightarrow Wb$ ,  $W \rightarrow q\bar{q}'$  oder  $Z \rightarrow q\bar{q}$  unterschieden werden. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, ist es notwendig, die Impulse der Jets bzw. der Partonen genau zu vermessen. Dazu braucht man Kalorimeter mit den folgenden Eigenschaften:

- Hervorragende Energieauflösung für Jets,
- sehr gute Hermetizität bis hin zu kleinsten Polarwinkeln,
- hervorragende Winkelauflösung,

- die Fähigkeit, die Photonenrichtung genau zu rekonstruieren,
- gute Zeitauflösung, um zu verhindern, dass sich mehrere Ereignisse im Kalorimeter überlagern.

Bei LEP und SLC wurde gezeigt, dass die Messung des so genannten „Energy Flow“ ein wesentliches Werkzeug in der Rekonstruktion von Ereignissen darstellt. „Energy Flow“ heißt, dass die Energie und die Richtung des Energieflusses im Ereignis präzise durch eine Kombination von Spurrückbau- und Kalorimetern gemessen werden. Die Spurrückbau- und die Kalorimeter messen die Energie der geladenen Teilchen, die Kalorimeter die der neutralen Teilchen. Entscheidend dabei ist die Fähigkeit des Systems, einzelne Teilchen zu vermessen. Das bedeutet, dass die normalerweise für ein Kalorimeter zitierte Energieauflösung, die eine Eigenschaft für viele Teilchen beschreibt, weniger wichtig ist als die Granularität und das Verhalten bei einzelnen Teilchen.

Ein Konzept, das diesen Anforderungen am nächsten kommt, ist das eines „sampling“ Kalorimeters mit hoher transversaler (das heißt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Schauers) und longitudinaler Segmentierung, dessen Absorberplatten aus einem dichten Medium, wie zum Beispiel Wolfram, hergestellt sind.

Für TESLA ist deshalb ein Kalorimeter vorgeschlagen worden, das eine sehr hohe transversale und longitudinale Segmentierung aufweist, und in dem sowohl das elektromagnetische als auch das hadronische Kalorimeter innerhalb der Spule angeordnet sind.

Die Zellgröße im elektromagnetischen Kalorimeter soll in transversaler Richtung etwa  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  sein, longitudinal sind 40 Lagen geplant, bei einer Tiefe des Gerätes von 24 Strahlungslängen. Die Absorberplatten sind aus Wolfram hergestellt, die Sensoren sind dünne Silizium-Detektoren.

Das hadronische Kalorimeter hat naturgemäß eine etwas größere Segmentierung. Die Zellen beginnen am inneren Radius mit einer Größe von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  und wachsen bis auf etwa  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  am äußeren Radius. Aus Kostengründen scheidet Wolfram als Absorber für dieses Kalorimeter aus, statt dessen ist Stahl vorgesehen. Die Signale werden mit Szintillatoren gemessen, die mittels Wellenlängenschiebern und langer klarer Glas-

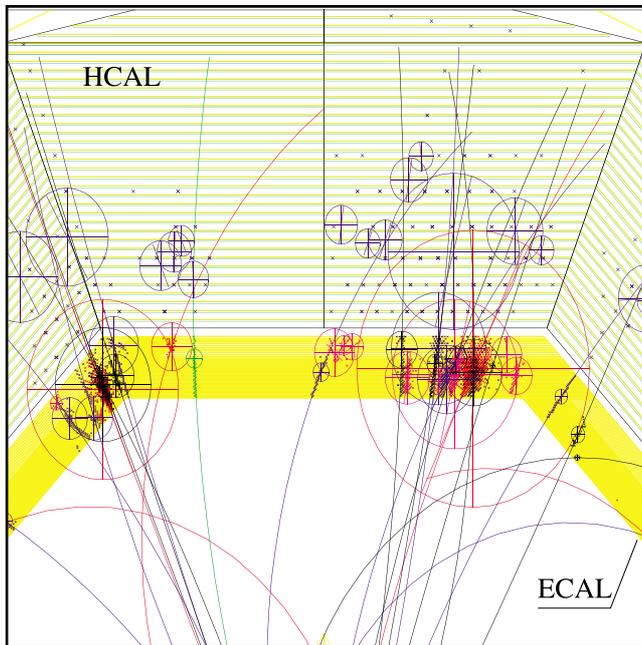


Abbildung 60: Ausschnitt aus einem hadronischen Ereignis, rekonstruiert im Kalorimeter. Ein Modul des Kalorimeters (1/8 des Umfanges) mit elektromagnetischem (ECAL) und hadronischem (HCAL) Teil ist sichtbar, der Wechselwirkungspunkt liegt unterhalb des Bildes. Die Punkte sind simulierte Signale in den Sensoren. Die Kreise geben die Position der rekonstruierten „cluster“ an, die Spuren die Ergebnisse der Rekonstruktion der Impulse der Teilchen, die die „cluster“ erzeugt haben. Nur kalorimetrische Information wurde verwendet.

fibern ausgelesen werden. In longitudinaler Richtung sind neun Ausleseebenen vorgesehen. Ein simuliertes Ereignis im Kalorimeter ist in Abbildung 60 gezeigt.

Ziel ist es, ein Kalorimeter mit einer Auflösung für den Energy Flow von  $30\%/\sqrt{E}$  zu bauen. Bei den LEP-Experimenten, die das Konzept der Energy Flow Analyse intensiv angewendet haben, konnte eine Auflösung von etwa  $60\%/\sqrt{E}$  erreicht werden.

In Rahmen der ECFA/DESY Studie sind intensive Studien zu einem solchen Kalorimeter begonnen worden. Gruppen aus Frankreich haben eine führende Rolle beim elektromagnetischen Kalorimeter übernommen, Gruppen vom DESY und aus Russland studieren das hadronische Kalorimeter. Auf die mechanischen und elek-

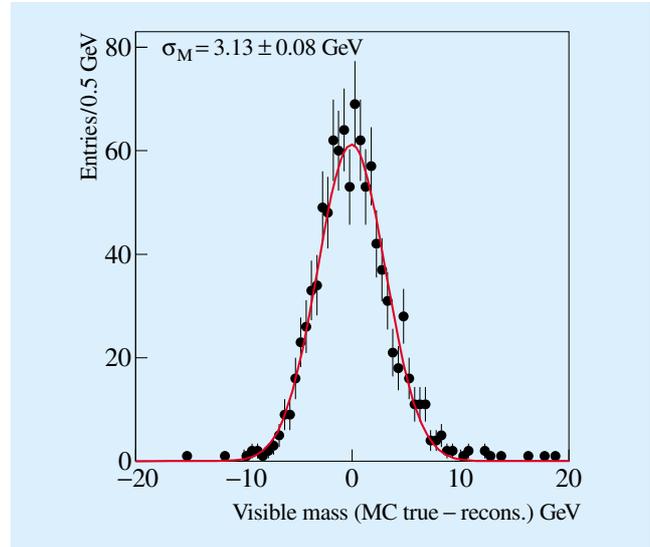


Abbildung 61: Massenverteilung für das Z-Boson, rekonstruiert in hadronischen Zerfällen.

trischen Probleme bei der Konstruktion eines solchen Gerätes soll hier nicht näher eingegangen werden.

Eine besondere Herausforderung ist es, ein möglichst hermetisches Kalorimeter zu bauen. Das bisher beschriebene Kalorimeter deckt den Bereich bis zu etwa  $5^\circ$  zur Strahlachse ab. Bei kleineren Winkeln steigt der Untergrund sehr schnell an. Zwei spezialisierte Kalorimeter sind in diesem Bereich vorgesehen.

Der sogenannte „Low Angle Tagger“ deckt den Bereich bis etwa  $1.5^\circ$  durch ein hoch-segmentiertes Silizium-Wolfram Kalorimeter ab. Dieses Kalorimeter ist in ein System von Wolfram-Masken integriert, die verhindern sollen, dass Untergrund, der von der Maschine erzeugt wird, in den Detektor gelangt.

Bei noch kleineren Winkeln ist ein Luminositäts-Monitor vorgesehen. Hier wird untersucht, ob Standard-Technologien dem Strahlenuntergrund standhalten, oder ob alternative Methoden verwendet werden müssen. In Hamburg wird der Einsatz von künstlichem Diamant als aktivem Medium im Gerät untersucht. Diamant zeichnet sich durch eine extreme Strahlenhärte aus, ist aber technisch schwerer zu beherrschen als Silizium und ist im Moment zumindest auch noch erheblich teurer. Ziel der Arbeiten ist es, zu untersuchen, ob Diamant den Anforderungen genügt, und die technischen Pro-

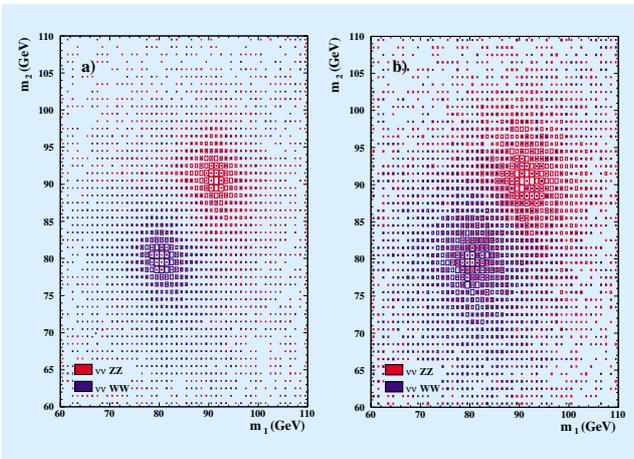


Abbildung 62: Rekonstruierte Masse für Ereignisse des Typs  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}WW$  und  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}ZZ$ , für eine Energy Flow Auflösung von a)  $30\%/\sqrt{E}$ , b)  $60\%/\sqrt{E}$ .

bleme im Zusammenhang mit der Konstruktion eines Kalorimeters mit Diamant-Auslese zu lösen.

Für einen vollständigen Entwurf sind umfangreiche Studien über das erwartete Verhalten des Kalorimeters notwendig. Dazu müssen die einzelnen Parameter in Simulationen optimiert werden. Erhebliche Arbeit ist deshalb in die Entwicklung geeigneter Simulations- und Analyse-Algorithmen geflossen. Institute aus Frankreich, aus den Niederlanden, aus Russland und vom DESY und von der Universität Hamburg waren an diesen Arbeiten beteiligt. In Abbildung 60 ist ein simuliertes Ereignis im Kalorimeter gezeigt. Die große Anzahl der Teilchen, die Dichte der einzelnen Schauer und der Überlapp zwischen benachbarten Schauern sind deutlich sichtbar. In dem Bild sind ebenfalls die Ergebnisse der Rekonstruktion gezeigt. Die Spuren entsprechen einzelnen Teilchen, die nur mit dem Kalorimeter rekonstruiert wurden, die Krümmung der Spuren ist ein Maß für ihren Impuls, gemessen nur mit dem Kalorimeter. Deutlich sichtbar ist, wie die hohe Granularität hilft, einzelne Spuren zu separieren, und den Einfluss durch überlappende Schauer klein zu halten.

Die Ergebnisse einer umfassenden Simulation des Kalorimeters sind noch nicht endgültig verfügbar. Erste Ergebnisse sind allerdings sehr ermutigend. In Abbildung 61 ist die Massenauflösung für Z-Zerfälle

gezeigt, wenn die Z Bosonen rein hadronisch zerfallen. Die gemessene Breite ist  $3.1 \text{ GeV}$ , in Übereinstimmung mit der Erwartung für eine Energy Flow Auflösung von  $30\%/\sqrt{E}$ . Der Einfluss auf physikalische Analysen ist in Abbildung 62 gezeigt. Untersucht wird hier, wie Ereignisse vom Typ  $\nu\bar{\nu}WW$  von Ereignissen des Typs  $\nu\bar{\nu}ZZ$  getrennt werden können. In der rechten Abbildung ist die Situation für eine Energy Flow Auflösung von  $60\%/\sqrt{E}$  gezeigt, links für die angestrebten  $30\%/\sqrt{E}$ . Die Separation ist deutlich verbessert.

In den nächsten Monaten werden die Arbeiten zur Entwicklung einer kompletten Rekonstruktions-Software im Kalorimeter weiter fortgesetzt werden. Darüber hinaus ist eine Reihe von Entwicklungsarbeiten geplant, um die Realisierbarkeit des vorgestellten Konzeptes im Detail zu demonstrieren.

## Zusammenfassung

Die ECFA/DESY Studie und die Anfertigung des TDR haben zu einer sehr dynamischen Entwicklung der Studien des physikalischen Potenzials und der technischen Realisation eines Experiments bei TESLA geführt. Wesentliche Fortschritte konnten im Verständnis der Physik gemacht werden, wobei die einmaligen Forschungsmöglichkeiten bei TESLA und ihre Komplementarität zu den Forschungen beim LHC klar herausgearbeitet wurden. Die Realisierung der physikalischen Ziele stellt hohe Anforderungen an einen Detektor. Simulationsarbeiten sind bereits weit fortgeschritten, und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben begonnen. Die Arbeiten sind umfassend im TDR dokumentiert worden und bilden den Ausgangspunkt für zukünftige Entwicklungen.

Eine große Zahl von Gruppen aus vielen Ländern auch außerhalb Europas hat an der Fertigstellung der Arbeiten mitgewirkt. Die große Bandbreite und die grundlegende Natur der Physik, die bei TESLA erforscht werden kann, kombiniert mit den vielen unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, bilden den wesentlichen Anreiz, der die Attraktivität dieses Projektes erklärt.

# H1 preliminary

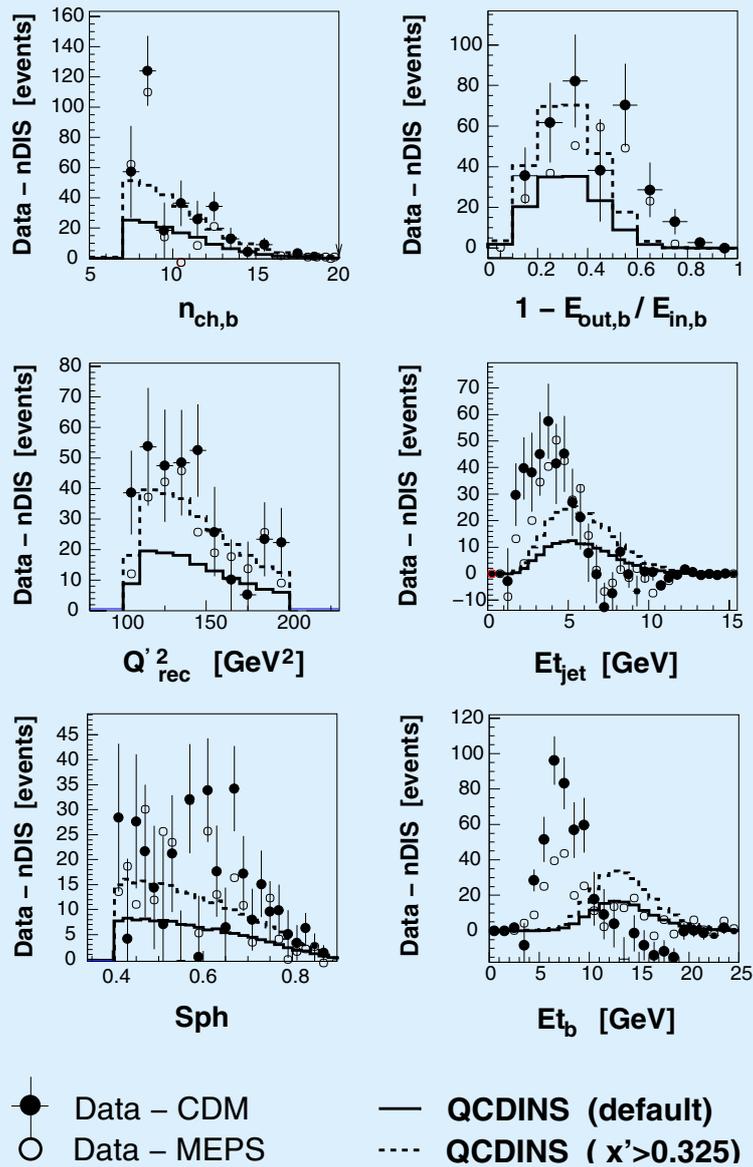


Abbildung 63: Beobachteter und theoretisch vorausgesagter Überschuss von Ereignissen mit „Instanton-Charakteristik“.

# Theoretische Physik

Sprecher: P. M. Zerwas

**Die DESY Theorie-Gruppe und das II. Institut für Theoretische Physik haben sich auf folgende Schwerpunkte konzentriert:**

- **Quantenchromodynamik in Analysen bei HERA and anderen Beschleunigern, sowie im starken Wechselwirkungsbereich auf dem Gitter;**
- **Flavour-Physik bei B-Mesonen;**
- **Zusammenhang von Neutrino-Physik mit Kosmologie;**
- **Higgs-Mechanismus und Supersymmetrie am  $e^+e^-$  Linear-Collider TESLA.**

**Supersymmetrische Elemente wurden darüber hinaus in der Kosmologie untersucht und Fragen der Supersymmetrie-Brechung auf dem Gitter analysiert.**

**Problemstellungen verbunden mit der Gravitation wurden im Rahmen von Quantenfeldtheorien in gekrümmter kontinuierlicher und nicht-kommutativer Raum-Zeit behandelt.**

**In enger Zusammenarbeit mit experimentellen Gruppen wurden die physikalischen Grundlagen für den im Design-Stadium befindlichen  $e^+e^-$  Linear-Collider TESLA erarbeitet und im Technical Design Report zusammenfassend dargestellt.**

## Quantenchromodynamik

### Instanton-induzierte Prozesse

Als nicht-störungstheoretische Fluktuationen der Gluon-Felder, mit einer typischen Ausdehnung von etwa 0.5 fm, stellen Instantonen einen grundlegenden Aspekt der QCD dar. Vor etwa 25 Jahren wurden sie von Belavin et al. theoretisch gefunden und von 't Hooft erstmalig untersucht. Trotz überzeugender theoreti-

scher Hinweise auf ihre Existenz steht ein direkter experimenteller Nachweis bis heute aus.

Vor einigen Jahren wurde jedoch in der Theoriegruppe realisiert [DESY 00-89], dass die tiefunelastische Streuung bei HERA eine einzigartige Möglichkeit bietet, harte, durch QCD-Instantonen induzierte Tunnelprozesse zu entdecken, die mit einer Verletzung der Quark-„Händigkeit“ einhergehen und daher in der störungstheoretischen QCD verboten sind. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass die Rate im messbaren Bereich sowie die charakteristische Endzustands-Signatur theoretisch vorhergesagt werden konnten [DESY 99-180, 00-089].

Sehr interessante, aber noch nicht schlüssige (vorläufige) Ergebnisse einer ersten, auf die Instanton-Suche spezialisierten H1-Analyse tiefunelastischer Daten wurden kürzlich auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Die Suchstrategie folgte weitgehend einem mit Experimentalphysikern gemeinsam entwickelten Verfahren [DESY 99-067].

In einem Bereich eines geeigneten Satzes von Messgrößen, in dem gemäß Monte Carlo-Information das Trennvermögen zwischen üblichen tiefunelastischen Prozessen ( $n$ DIS = CDM, MEPS) und Instanton-Ereignissen (QCDINS) optimal ist, wurde tatsächlich ein statistisch signifikanter Überschuss gefunden (Abb. 63). Allerdings gestatten die Unsicherheiten der Modellierung dieses wenig erforschten Phasenraumbereiches noch keine weitergehenden Aussagen.

Insgesamt ergab sich eine überraschend gute Übereinstimmung der beobachteten Überschüsse in vier der sechs betrachteten charakteristischen Verteilungen mit den Monte Carlo Vorhersagen (QCDINS [DESY 99-180]) für Instanton-Ereignisse (Abb. 63).

Die verbleibenden Diskrepanzen in der Transversalenergie des „current“-Jets ( $E_{t_{jet}}$ ) und des Instanton-

„Feuerballs“ ( $E_{t_b}$ ) verringern sich stark [DESY 00-172], wenn auch in den Daten die theoretisch benötigten Selektionsschnitte angebracht werden. Dementsprechend sollten die Instanton-Effekte im Vergleich zur Referenz-Voraussage (durchgezogene Linie) gemäß den gepunkteten Linien in Abbildung 63 verlaufen.

## Diffraktion

Zur Untersuchung der bei HERA beobachteten diffraktiven Endzustände in der tiefunelastischen Elektron-Proton Streuung hat sich, im Ruhesystem des Protons, das Konzept der Photonwellenfunktion als sehr nützlich erwiesen: in führender Ordnung wurden erstmals die Quarkmassen in der Nicht-Vorwärtsrichtung berücksichtigt [DESY 99-164], und erste nichtführende Korrekturen wurden in [DESY 00-132] berechnet. Die Quark-Antiquark-Gluon-Komponente der Wellenfunktion wurde berechnet und auf die diffraktive Charm-Produktion angewandt [hep-ph/0010300]. Das Modell „weicher Farbwechselwirkungen“ wurde weiterentwickelt und verglichen mit HERA Daten sowie Daten von Proton-Antiproton Kollisionen am Tevatron (USA). Eine QCD-Analyse von diffraktiven Strukturfunktionen aus H1 und ZEUS Daten wurde in [hep-ph/0010015] durchgeführt. In [DESY 00-154] wurde der Versuch unternommen, eine allgemeinere Standortbestimmung der Diffraktion bei HERA durchzuführen.

Die Arbeiten [hep-ph/0010300], [hep-ph/0010015] und [DESY 00-154] wurden in Zusammenarbeit von Theoretikern und Mitgliedern der H1 und ZEUS Kollaborationen durchgeführt. In der experimentellen Analyse [DESY 00-174] wurden H1 Daten für diffraktive Jet-Produktion mit theoretischen Vorhersagen verglichen (Abb. 64).

Zur Diffraktion bei LEP wurde eine neue Rechnung zur  $\gamma^*\gamma^*$  Streuung durchgeführt, bei der erstmalig Quarkmassen berücksichtigt werden [DESY 00-055]. Erste Resultate zu NLO-Korrekturen der Photon-Pomeron Kopplung finden sich in [DESY 00-132].

## Strukturfunktionen

In [DESY 00-117] wurde eine theoretische Untersuchung der QCD Faktorisierung bei kleinen  $x$ -Werten durchgeführt. Der Versuch einer numerischen Ab-

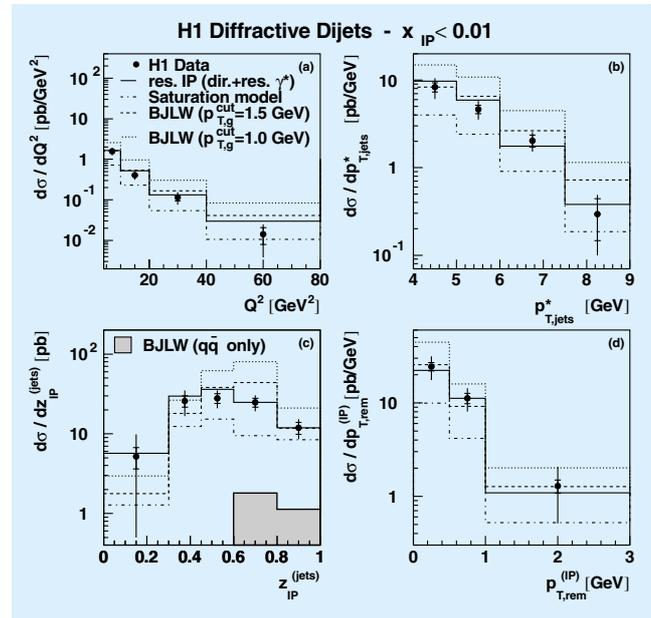


Abbildung 64: Vergleich von Daten zur diffraktiven Jet-Produktion mit theoretischen Vorhersagen.

schätzung von „Higher Twist“ Beiträgen in den bei HERA vermessenen tiefunelastischen Strukturfunktionen bei kleinen  $x$  und niedrigen  $Q^2$ -Werten wurde in [DESY 00-038] beschrieben. Ein geometrisches Skalierungsverhalten der Strukturfunktion  $F_2(x, Q^2)$  wurde in [DESY 00-103] beobachtet.

## Fragmentationsfunktionen

Aus Präzisionsdaten der inklusiven Hadronen-Erzeugung in der  $e^+e^-$ -Vernichtung bei PEP und LEP1 wurden im Rahmen des Parton-Modells der Quantenchromodynamik (QCD) zu nächstführender Ordnung Fragmentationsfunktionen für geladene Pionen und Kaonen sowie (Anti)Protonen extrahiert. Gleichzeitig wurde ein verbesserter Wert für die starke Kopplungskonstante ermittelt, der mit dem derzeitigen Weltmittelwert gut verträglich ist, nämlich

$$\alpha_s^{(5)}(M_Z) = 0.1170 \pm 0.0073 .$$

$e^+e^-$ -Daten von DORIS, PETRA und LEP2 bzw.  $p\bar{p}$ -,  $\gamma p$ -, und  $\gamma\gamma$ -Daten von Sp $\bar{p}$ S, Tevatron, HERA und

LEP2 stimmen gut mit den entsprechenden, aus diesen Fragmentationsfunktionen gewonnenen Vorhersagen überein, im Einklang mit der erwarteten Skalenverletzung bzw. Universalität [DESY 00-053, 086, 092, 158].

## Schwere Quarks

QCD Korrekturen wurden berechnet für mehrere Prozesse mit schweren Quarks, die Präzisionsstudien der elektroschwachen Wechselwirkung erlauben, wie die Produktion von bottom-Quarks in der  $e^+e^-$  Anihilation und von top-Quarks an Hadron-Collidern [DESY 00-120, 121].

Ebenfalls in der QCD Störungstheorie untersucht wurde die Kopplung des  $\eta'$ -Mesons an Gluonen, die für die Beschreibung verschiedener Zerfälle der B-Mesonen nötig ist [DESY 00-093].

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz sogenannter Farboktettprozesse in der Natur vorher, das heißt schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind.

Ein aufschlussreicher Test dieser Hypothese ergab sich aus dem Vergleich des am Tevatron gemessenen Polarisationsgrades prompt erzeugter  $J/\psi$ -Mesonen mit der NRQCD-Vorhersage, wobei zwar gute Übereinstimmung bei kleinen Transversalimpulsen  $p_T$ , aber eine gewisse Diskrepanz bei den höchsten  $p_T$ -Werten gefunden wurde [DESY 99-175, 00-067, 092, 107].

Im Rahmen der NRQCD wurden die führenden doppelt-logarithmischen Korrekturen der Form  $\alpha_s^3 \ln^2(1/\alpha_s)$  zur Wellenfunktion eines schweren Quark-Antiquark-Bindungszustandes am Ursprung berechnet, welche die Erzeugungs- und Zerfallsraten schwerer Quarkonia bestimmt.

Im Falle der top-Quark-Paarzeugung bei TESLA führen diese Korrekturen zu einer Absenkung des Wirkungsquerschnitts im Schwellenbereich um etwa 10% [DESY 99-173, 00-173].

Der Zusammenhang zwischen den  $\overline{MS}$ - und On-Shell-Definitionen der Quark-Masse wurde zu drei Quantenschleifen in der QCD berechnet. Die Kenntnis dieser

Korrektur wird die theoretische Unsicherheit, mit der die Masse des top-Quarks bei TESLA bestimmt werden kann, erheblich verringern [DESY 99-147, 00-034].

## B-Mesonen

Das Studium der CP-Verletzung im System der B-Mesonen erlaubt eine strenge Überprüfung der Beschreibung der CP-Verletzung durch das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung.

Eine Schlüsselrolle kommt hierbei dem Unitaritätsdreieck der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix zu, welches aus der Unitarität dieser Matrix folgt. Die Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  dieses Dreiecks sind für die Präzisionsmessung der Quarkflavour-Übergänge sowie der CP-Asymmetrien in B-Meson-Zerfällen von zentraler Bedeutung. Gibt es neue Physik, so erwartet man eine Verschiebung der Spitze des Dreiecks oder sogar neue topologische Konfigurationen. Das theoretische Profil des Unitaritätsdreiecks wurde innerhalb des Standard-Modells und supersymmetrischer Theorien unter Berücksichtigung von QCD-Korrekturen im Hinblick auf die zu erwartenden experimentellen Resultate sowohl der B-Fabriken am SLAC und KEK als auch der Experimente am Fermilab untersucht [DESY 00-026].

Für diese Studien ist die Massendifferenz  $\Delta M_s$  der  $B_s$ -Mesonen ein sehr wichtiger Parameter, der, wie neue experimentelle Ergebnisse zeigen, bei  $18 \text{ ps}^{-1}$  liegen könnte und dann zu einer starken Einschränkung des Unitaritätsdreiecks führen würde [DESY 00-182]. Da CP-verletzende Effekte in  $B_s$ -Zerfällen im Standardmodell vernachlässigbar klein sind, ist die Sensitivität der entsprechenden Observablen auf neue Physik sehr groß [DESY 99-191, 00-171].

Ein besonders interessanter  $B_s$ -Zerfall ist  $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ , der zum Beispiel in einem links-rechts-symmetrischen Modell mit spontaner CP-Verletzung CP-Asymmetrien bis  $\mathcal{O}(40\%)$  zeigen kann [DESY 99-191]. Ein herausragendes Element der reichhaltigen Phänomenologie der B-Physik [DESY 00-087, 170] ist die Bestimmung des Winkels  $\gamma$  des Unitaritätsdreiecks, für die Zerfälle des Typs  $B \rightarrow \pi K$  besonders vielversprechend sind [DESY 00-014, 051, 122].

Für B-Experimente an Hadron-Maschinen erscheint auch eine Bestimmung von  $\gamma$  aus Dreiecksrelationen zwischen  $B_c^\pm \rightarrow D_s^\pm D$  Zerfällen interessant [DESY 00-052]. Durch den Einfluss neuer Physik können sich Diskrepanzen zwischen den entsprechenden Werten für  $\gamma$  ergeben. Für die Phänomenologie der CKM-Matrix und die Suche nach Physik jenseits des Standard-Modells sind auch „seltene“ photonische und leptonische B-Zerfälle von großer Bedeutung [DESY 00-186]; wichtige Beispiele sind die Übergänge  $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$  und  $B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma$ . Isospin- und CP-verletzende Effekte in Zerfällen des Typs  $B \rightarrow \rho\gamma$  könnten Anzeichen für Supersymmetrie liefern [DESY 00-088].

Interessante Studien der CP-Verletzung in B-Zerfällen würden sich auch bei GIGA-Z eröffnen, einer Fabrik für  $10^9$   $Z^0$ -Bosonen durch einen linearen  $e^+e^-$ -Collider mit polarisierten Strahlen. An solch einer Maschine könnte man die Produktion und den Zerfall von b-Baryonen erforschen, nach  $b \rightarrow q\bar{\nu}$  Übergängen suchen und umfangreiche Studien inklusiver semileptonischer  $B_s$ -Zerfälle durchführen [DESY 00-183].

## Neutrino-Physik und Kosmologie

Die vom SuperKamiokande-Experiment beobachtete Anomalie der atmosphärischen Elektron- und Myon-Neutrino-Flüsse kann interpretiert werden als Konsequenz von Oszillationen zwischen Myon- und Tau-Neutrinos. Der entsprechende Mischungswinkel ist groß und die zugehörige Tau-Neutrino-Masse ist klein, sie beträgt nur etwa 0.03 eV. Majorana-Neutrinomassen unterhalb von 0.1 eV wurden erwartet in Modellen für die Entstehung der kosmologischen Baryon-Asymmetrie, die auf dem Zerfall schwerer Majorana-Neutrinos beruhen (Leptogenese) [DESY 99-187].

Die Entstehung der Baryon-Asymmetrie ist ein Nichtgleichgewichtsprozess, der unter Verwendung von Boltzmann-Gleichungen berechnet wird. Erste Fortschritte wurden auch für eine vollständig quantenmechanische Beschreibung erzielt, die eine Berechnung von Korrekturen zu den Boltzmann-Gleichungen erlaubt [DESY 00-056]. Aufgrund der hohen Temperatur im frühen Universum, bei der die Baryon-Asymmetrie erzeugt wurde, führen Leptogenese-Modelle zu Einschränkungen an das Massenspektrum supersymmetrischer Teilchen. Eine besondere Rolle spielt dabei das

Gravitino, das den Hauptanteil der im Universum vorhandenen dunklen Materie ausmachen könnte [DESY 00-167].

Die Resultate der Boomerang- und Maxima-Experimente geben zum ersten Mal Einblick in Details der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Rückschlüsse auf den Ursprung der Dichtefluktuationen zur Zeit der Photon-Entkopplung erlauben. Die Größe des spektralen Index der Hintergrundstrahlung unterscheidet zwischen verschiedenen Modellen der Inflation. Modelle mit „laufender“ Inflaton-Masse sagen dabei eine testbare Abweichung vom skaleninvarianten Grenzfall voraus [DESY 00-029, 119]. In supersymmetrischen Theorien wird die inflationäre Phase maßgeblich von der Art der Supersymmetriebrechung beeinflusst. Von Bedeutung ist dabei auch die Forderung nach einer extrem kleinen kosmologischen Konstanten im Grundzustand in Übereinstimmung mit den experimentellen Schranken [DESY 00-082]. Der Grund für das Fehlen eines Vakuumbeitrags zur Energiedichte oberhalb der kritischen Dichte könnte die Existenz eines fast masselosen Feldes extrem kleiner Masse sein (Quintessence) [DESY 00-63].

## Higgs-Mechanismus

Die Lösung der Frage, ob die Massen der fundamentalen Teilchen, Leptonen, Quarks und elektroschwache Eichbosonen, durch den Higgs-Mechanismus erzeugt werden, ist eine der wichtigsten Aufgabenstellungen in der Physik. An den in Kürze verfügbaren Hadron-Collidern Tevatron und LHC kann das Higgs-Boson entdeckt werden, wohingegen das grundlegende Verständnis des mikroskopischen Mechanismus der Massenerzeugung [DESY T-00-01] Hoch-Präzisionsanalysen an einem  $e^+e^-$  Linear-Collider wie TESLA erfordert [DESY 99-178].

Mit den in diesem Komplex aufgeworfenen physikalischen Fragestellungen hat sich ein Teil der Theoriegruppen befasst.

Mit Hilfe der Analyse des Myon-Zerfalls konnten die Abschätzungen der Higgs-Masse aus Präzisionsmessungen auf eine solide theoretische Grundlage gestellt werden [DESY 00-101]. Es wurde durch die Berechnung von Zwei-Schleifen Beiträgen im fermionischen

Bereich gezeigt, dass eine konsistente Vorhersage der Higgs-Masse im Bereich von 100 bis 200 GeV erzielt werden kann – eine essentielle Aussage für die Festlegung der Energie eines  $e^+e^-$  Linear-Colliders der ersten Phase. Falls eine solche Anlage mit hoher Luminosität bei Energien im Bereich der Z-Masse betrieben wird, können die Phänomene der elektroschwachen Symmetriebrechung auf Quanten-Niveau mit hoher Präzision untersucht werden [DESY 00-050].

Die Einbettung des Standard-Modells in eine supersymmetrische Theorie führt zu einer komplexen Erweiterung des Higgs-Sektors. In der minimalen supersymmetrischen Theorie werden drei neutrale und zwei geladene Higgs-Bosonen vorhergesagt. Das leichteste neutrale Teilchen besitzt eine obere Massenschranke von 140 GeV, das heißt in einem idealen Bereich für die Untersuchung bei TESLA. Diese Schranke ist in einer abschließenden Untersuchung theoretisch etabliert worden [DESY 99-183, 197]. Automatisierte analytische Rechenprogramme [DESY 00-020] haben dabei wertvolle Hilfe für die technische Bearbeitung der Zwei-Schleifen Korrekturen geleistet.

Die Massen der geladenen Higgs-Bosonen liegen in vielen Modellen im Bereich von mehreren hundert GeV, und es bedarf hochenergetischer Collider, um diese Teilchen zu erzeugen. Während die Berechnung von Produktionsraten an einem  $e^+e^-$  Collider [DESY 99-178] einfach ist, ist der theoretische Apparat für die Lösung dieser Aufgabe am Hadron-Collider LHC kompliziert. Geladene Higgs-Paare und Mischpaare von Higgs- und Eich-Bosonen sind in einer Reihe von Kanälen untersucht worden [DESY 00-110]. Für nicht zu schwere Higgs-Teilchen bieten sie erste Produktionsmöglichkeiten im Vorfeld der Lepton-Collider.

Die experimentelle Bestimmung der Eigenschaften von Higgs-Teilchen gibt Aufschluss über die Grundzüge des Higgs-Mechanismus. Für diese physikalischen Fragestellungen sind die theoretischen Grundlagen geschaffen worden durch Zerfallsanalysen von Higgs-Teilchen im Standard-Modell [DESY 00-079] sowie in supersymmetrischen Modellen [DESY 00-028]. Verallgemeinerte Kopplungen lassen sich durch Produktionsraten und Winkelverteilungen einschränken [DESY 99-190]. Die Abstrahlung der Higgs-Bosonen von Quarks [DESY 99-177], paarweise erzeugt in  $e^+e^-$  Kollisionen, bietet eine weitere Möglichkeit, die Fundamentalparameter des Higgs-Sektors zu bestimmen.

## Supersymmetrie

Die Existenz eines leichten Higgs-Bosons, verbunden mit der großen Vereinigung der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Kräfte bei sehr hohen Energien, zieht nahezu zwangsläufig die Supersymmetrisierung des Standard-Modells nach sich.

In einer solchen Theorie werden den Teilchen des Standard-Modells Partner zugeordnet, die sich um eine halbzahlige Spin-Einheit unterscheiden. Diese Kohabitation von Fermionen und Bosonen stabilisiert die Extrapolation von der elektroschwachen Niederenergie-Skala zur hochenergetischen Vereinigungsskala in der Nähe der Planck-Skala, an der die Teilchenphysik mit der Gravitation verbunden wird.

Die Extrapolation und die Rekonstruktion der fundamentalen Theorie bei hohen Energien kann nach Auswertung der Experimente im Supersymmetrie-Sektor an einer Hoch-Präzisionsmaschine wie TESLA erfolgreich bewältigt werden [DESY 99-181].

Ein besonders interessantes supersymmetrisches Ensemble sind Charginos und Neutralinos. Dies sind die Partner der elektroschwachen geladenen und neutralen Eich- und Higgs-Bosonen, sie tragen halbzahligen Spin. Da sie eine in sich abgeschlossene physikalische Einheit bilden und komplexe Strukturen aufweisen, sind sie intensiv untersucht worden. Aus Wirkungsquerschnitten und Winkelverteilungen können die Massen- und die Mischungs-Parameter der Charginos vollständig rekonstruiert werden [DESY 99-198, 00-001]. Das analoge Programm für Neutralinos ist komplizierter, da diese Teilchen Mischzustände aus vier unterschiedlichen Komponenten sind. Es erzwingt die Nutzung von Polarisierungseffekten, mit deren Hilfe die Struktur der Teilchen bei TESLA aufgelöst werden kann [DESY 00-001, 003, 098]. Der Majorana-Charakter der Neutralinos erfordert dabei spezielle Aufmerksamkeit [DESY 00-100].

## Gittereichtheorien

In der Gitterformulierung der Quantenfeldtheorie können die nicht-störungstheoretischen Phänomene im Standard-Modell, die starke Wechselwirkungen bein-

halten, berechnet werden. Die theoretischen und numerischen Untersuchungen konzentrieren sich in erster Linie auf verschiedene Fragen in der Quantenchromodynamik. Aber auch andere Quanten-Eichfeldtheorien, wie zum Beispiel die supersymmetrische Yang-Mills-Theorie, liefern wichtige Erkenntnisse für das Verständnis der Struktur des Standard-Modells.

Im Rahmen der Gittereichtheorie besteht die Möglichkeit, verschiedene physikalische Parameter wie zum Beispiel das Hadron-Spektrum, die Formfaktoren und die elektroschwachen Matrixelemente oder die Eigenschaften der Materie bei Phasenübergängen zu berechnen. Dazu werden leistungsfähige Computer benötigt, die die Parallelverarbeitung auf vielen Prozessoren ermöglichen. Die numerischen Algorithmen müssen für eine effiziente Parallelverarbeitung entsprechend angepasst werden. Für diese Arbeit steht seit Mitte 2000 ein dediziertes PC-Cluster aus acht Pentium-III Prozessoren bei DESY-Hamburg zur Verfügung. Mehrere größere Parallelrechner für die Gittereichtheorie sind bei DESY-Zeuthen im Einsatz.

### Eigenschaften der Materie bei hohen Quark-Dichten

In der Quantenchromodynamik wird erwartet, dass sich bei sehr hohen Baryon- (oder Quark-) Dichten die charakteristischen Freiheitsgrade wesentlich ändern. Sie werden nicht mehr „hadronisch“, wie die zusammengesetzten Protonen und Neutronen, sondern „partonisch“ wie die elementaren Quarks und Gluonen. Diese Änderung kann zu einem Phasenübergang führen, wobei im Grundzustand der Materie eine Kondensation von Diquark-Paaren stattfindet. Das kann zu interessanten Phänomenen wie Supraleitung oder Superfluidität führen, die erwartungsgemäß in Neutronensternen zu beobachten sind.

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts hat die DESY-Swansea-Kollaboration eine Modelluntersuchung mit Quarks in der adjungierten Darstellung der  $SU(2)$ -Farbgruppe durchgeführt [DESY 00-083, 155, 175]. Dabei wurde der multi-bosonische Algorithmus im Zwei-Schritt Verfahren eingesetzt [DESY 99-170], der auch die Effekte der Änderung des Vorzeichens der Fermion-Determinante richtig berücksichtigt. Die

Existenz des erwarteten Phasenübergangs wurde bestätigt und die ersten Resultate für die Zustandsgleichung und für die Änderung der effektiven Pion-Masse erreicht.

### Supersymmetrie-Brechung in der Yang-Mills-Theorie

Supersymmetrie ist ein notwendiger Bestandteil der modernen Theorien der Quantengravitation und ist ein wesentliches Element in den meisten Erweiterungen des Standard-Modells. Die Brechung der Supersymmetrie im heute experimentell erreichbaren Energiebereich ist eine zentrale theoretische Frage. Zahlreiche Modelle für die Supersymmetrie-Brechung basieren auf den nicht-störungstheoretischen Eigenschaften der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie. Diese Theorie beschreibt die Wechselwirkung des Eichfelds mit einem masselosen Majorana-Fermionfeld in der adjungierten Darstellung (das Gaugino).

In der Gitter-Regularisierung wird die Supersymmetrie bei nichtverschwindender Gitterkonstante durch Gitterartefakte gebrochen. Eine konsistente Beschreibung setzt die Wiederherstellung der Supersymmetrie im Kontinuumslimit voraus, wobei die Möglichkeit der dynamischen Symmetriebrechung, zum Beispiel durch die Kondensation des Gauginofelds, bestehen bleibt.

Die Supersymmetrie kann in den numerischen Simulationen mit der Überprüfung der entsprechenden Ward-Takahashi-(WT-)Identitäten verdeutlicht werden. Die DESY-Münster-Roma-Kollaboration hat die WT-Identitäten auf dem Gitter numerisch untersucht [DESY 00-156, 159]. Die ersten Resultate zeigen, dass die Supersymmetrie im Rahmen der numerischen Genauigkeit – wie erwartet – erfüllt ist. Die aus den WT-Identitäten berechneten Werte der Gaugino-Masse können zur Definition des supersymmetrischen Limes bei verschwindender Gaugino-Masse benutzt werden.

### Gravitation

Einer der Schwerpunkte der Arbeitsgruppe „Quantenfeldtheorie und Mathematische Physik“ war die Untersuchung von Quantenfeldtheorien in gekrümmter Raumzeit [DESY 99-032]. Zu diesem Zweck wurde

eine störungstheoretische Konstruktion der Algebren lokaler Observablen durchgeführt. Es zeigte sich, dass diese Konstruktion auch im klassischen Limes sinnvoll bleibt, und dass die Loop-Entwicklung der Störungstheorie eine Familie lokaler Observablenalgebren liefert, die zwischen der Poisson-Algebra der klassischen Feldtheorie und der nichtkommutativen  $*$ -Algebra der Quantenfeldtheorie interpoliert [DESY 00-013]. Weiter wurde eine neuartige Ward-Identität („Master-Ward-Identität“) studiert, die nicht nur die bekannten Ward-Identitäten impliziert, sondern auch die algebraischen Eigenschaften der wechselwirkenden Felder kontrolliert.

Hierdurch kann die Becchi-Rouet-Stora Symmetrie auf der Ebene der Quantenfelder als gradierte Derivation mit Quadrat 0 verstanden werden [DESY-T-1999-032]. (Für einen anderen Zugang zu Eichtheorien siehe [DESY 99-144].) In diesem Zusammenhang wurden auch der Energie-Impuls-Tensor [DESY 00-176] und die Operator-Produkt-Entwicklung [DESY 00-177] im Rahmen der kausalen Störungstheorie untersucht.

Ein anderes Projekt war der Rolle der Renormierungsgruppe gewidmet. Ausgehend von einer unveröffentlichten Arbeit von Popineau und Stora wurde gezeigt, wie die endlichen Renormierungen in der kausalen Störungstheorie systematisch behandelt werden können [DESY 99-168]. Der Zusammenhang mit der Hopf-Algebra-Struktur der Renormierung, die von Kreimer entdeckt worden ist und für großes Aufsehen unter Mathematikern gesorgt hat, wurde aufgezeigt [hep-th/0012057].

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 und der Renormierbarkeit.

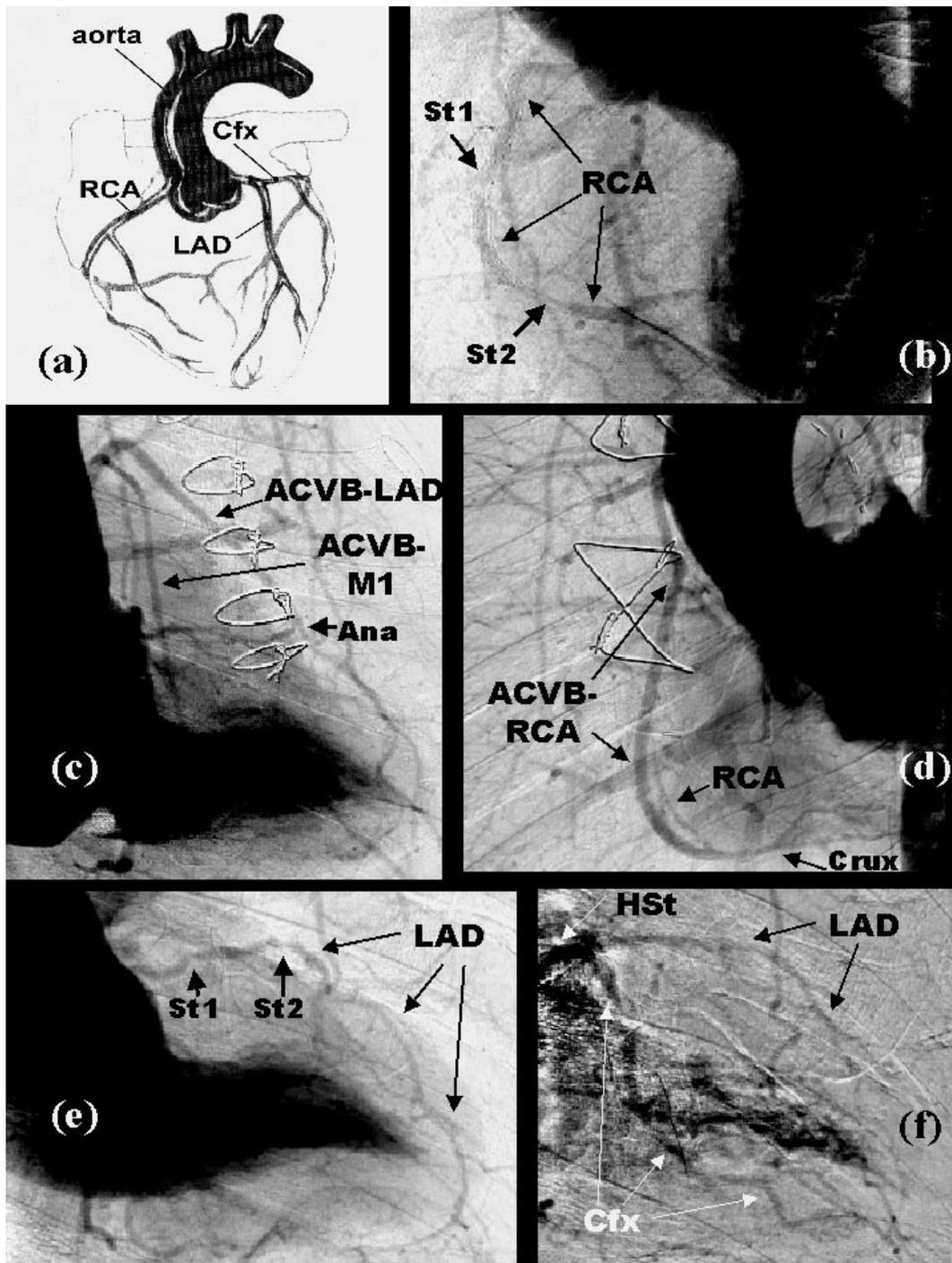


Abbildung 65: Angiogramme nach Injektion von 30 ml Kontrastmittel in die Armvene: (a) Schema des Koronarbaums, (b) LAO60°-Projektion – RCA mit In-Stent-Restenose (St1) und Stenose direkt hinter den Stents (St2), (c) RAO45°-Projektion – Bypass auf die LAD (Ana = Anastomose) und auf einen Seitenast der Cfx (M1), (d) LAO30°-Projektion – Bypass auf die RCA, die RCA wird retrograd gefüllt (crux = crux cordis), (e) RAO30°-Projektion – LAD mit 2 Stenosen (St1, St2), St2 an der Interventionsstelle, (f) RAO30°-Projektion – Cfx, LAD und Hauptstamm (HSt), das Bild wurde mit „Unsharp Masking“- Technik bearbeitet.

# Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB

Leiter: J.R. Schneider, DESY

Im Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB 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 hin zu 300 keV überstrichen.

Eine Außenstelle 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.

Über die enge Zusammenarbeit mit dem II. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg beteiligt sich HASYLAB an der Ausbildung von Studenten der Physik.

Am 22. Februar 2000, gerade rechtzeitig zur EXPO Ausstellung „Licht der Zukunft“, konnte am Freie-Elektronen Laser (FEL) der TESLA Test Facility (TTF) das Prinzip der selbstverstärkenden spontanen Emission (Self Amplified Spontaneous Emission – SASE) bei einer Wellenlänge von 108 nm demonstriert werden. In den darauf folgenden Wochen wurde die Durchstimmbarkeit des FEL im Wellenlängenbereich zwischen 80 und 100 nm gezeigt, und zwar mit einer Verstärkung zwischen 103 und 104 bei einer Bunchladung von 1 nC (Abb. 66). Dies sind die kürzesten Wellenlängen, die jemals mit einem Freie-Elektronen Laser erzielt wurden. Die Sättigung des SASE Prozesses mit einer Verstärkung in der Größenordnung von 106 bis 107 wurde dabei noch nicht erreicht.

Am Ende der Messzeit wurde bei einer Bunchladung von 3 nC eine Verstärkung von etwa 105 beobachtet. Diese großen Erfolge sind den Anstrengungen der gesamten TESLA Kollaboration, getragen von Wissenschaftlern und Ingenieuren aus 39 Instituten und 9 Ländern, zu verdanken.

Im zweiten Halbjahr 2000 lag der Schwerpunkt der Arbeiten an der TESLA Test Facility bei Maschinenstudien am Linearbeschleuniger, wobei es insbesondere um die Erzeugung von langen Bunchzügen mit hoher Bunchladung zum Studium von Moden höherer Ordnung in den Beschleunigerkavitäten ging.

Im Jahr 2001 wird der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Optimierung des FEL Betriebes im Wellenlängenbereich um 100 nm liegen.

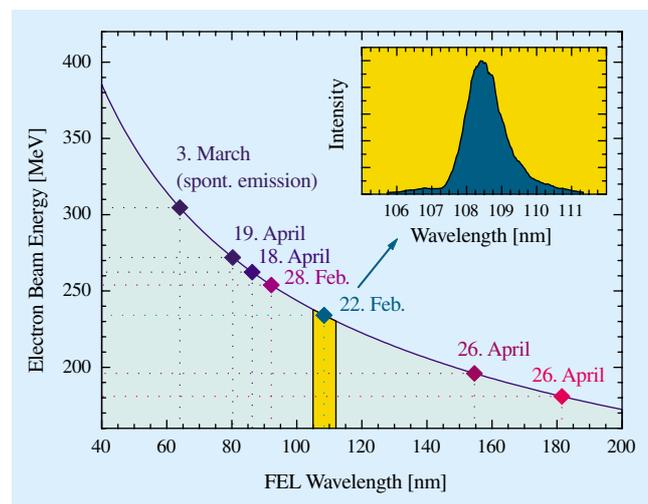


Abbildung 66: Durchstimmbarkeit der Wellenlänge am FEL der TESLA Test Facility als Funktion der Elektronenstrahlenergie. Mit Rauten sind die FEL Wellenlängen gekennzeichnet, bei denen Verstärkungen nach dem SASE Prinzip erreicht wurden. Der Bildausschnitt (oben rechts) zeigt die Spektralverteilung der zuerst beobachteten FEL Strahlung am TTF.

Parallel zum FEL Betrieb wird mit dem Aufbau der Infrastruktur im fertigen Tunnel und in der Experimentierhalle des VUV FEL begonnen. Später werden der 30 m lange Undulator und die Kryomodule für den Beschleuniger sowie die Verbindungen zu den Messplätzen und die Strahldiagnostik eingebaut. Alle Komponenten sollen im Sommer 2002 installiert sein. Damit endet dann auch die derzeitige Phase I von Aufbau und Betrieb der TTF. Für den Übergang von Phase I zu Phase II, der endgültigen VUV FEL Konfiguration, wird ein weiteres Jahr veranschlagt. Das erste Laserlicht in der FEL Experimentierhalle wird für Dezember 2003 erwartet.

Im Jahr 2000 wurde der Technical Design Report (TDR) für TESLA erarbeitet, der sowohl das technische Layout der Maschine als auch das wissenschaftliche Potential für die Teilchenphysik und die Synchrotronstrahlung umfassen wird, sowie Zeitpläne und Kostenabschätzungen. Dafür wurden bei HASYLAB acht Workshops zu verschiedenen Anwendungsbereichen des TESLA Röntgenstrahlung-FEL organisiert, an denen 190 Wissenschaftler aus 18 verschiedenen Ländern teilnahmen. Die Ergebnisse aus diesen Workshops sind im TDR zusammengefasst. Für Strahlführungen und Experimentierplätze sowie deren Verteilung im FEL Labor wurden detaillierte Studien durchgeführt. Der TDR wird der Öffentlichkeit auf dem Kolloquium „Scientific Perspectives and Technical Realisation of TESLA“ am 23./24. März 2001 bei DESY in Hamburg vorgestellt werden.

Wie bereits im Sommer 1999 entschieden, wird DESY auch während der Konstruktionsphase und der Inbetriebnahme von TESLA Synchrotronstrahlung hoher Qualität an den Speicherringen DORIS und/oder PETRA zur Verfügung stellen. Die erste Version einer Studie für den möglichen Ausbau von DORIS wurde Ende November 2000 fertig gestellt. Eine weitere Studie zum Ausbau des PETRA-Speicherrings zu einer dedizierten Synchrotronstrahlungsquelle mit etwa 10 Undulatorstrahlen mit einer Strahlqualität, wie sie heute bei der ESRF erreicht wird, soll im Mai 2001 vorliegen. Auch diese Studie wird zuerst mit Maschinen-Experten diskutiert werden. Anschließend werden beide Ausbaupläne der HASYLAB Nutzerschaft vorgestellt. In der zweiten Hälfte des Jahres 2001 wird eine ausführliche Diskussion mit der HASYLAB Nutzergemeinde geführt werden mit dem Ziel, mittel- und langfristige Strategien für die Forschung mit Synchrotronstrahlung bei DESY festzulegen.

Im Berichtsjahr wurde DORIS III vom 3. Januar bis zum 2. Oktober 2000 mit einer Positronenenergie von 4.5 GeV und einem Strahlstrom von 150 mA bei einer Füllung mit fünf Bunchen betrieben. Die typische Lebensdauer des Strahls betrug 12 Stunden zu Beginn und 22 Stunden am Ende einer etwa zehnstündigen Strahlzeit. Den Nutzern standen 5011 Stunden Strahlzeit zur Verfügung, die in sieben Blöcke von in der Regel fünf Wochen Länge aufgeteilt und jeweils von einer Wartungswoche unterbrochen waren. Zur Optimierung des DORIS-Betriebs wurden an jedem zweiten, dritten und vierten Donnerstag eines Messzeitblocks Maschinenschichten von acht Stunden Länge eingeschoben. Für Experimente, die eine bestimmte Zeitstruktur benötigten, wurde der Speicherring zu etwa 20% seiner Betriebszeit im reduzierten Bunch Mode betrieben.

Die Zuverlässigkeit des DORIS III Betriebes verbesserte sich weiter auf 94.4%. Am PETRA-Speicherring standen im Jahr 2000 insgesamt 2200 Stunden parasitäre Messzeit zur Verfügung.

In einem längeren Winter-Shutdown vom 2. Oktober 2000 bis zum 12. Februar 2001 werden neue Vakuumkammern für alle Quadrupol Triplets installiert, so dass in Zukunft das Vakuumsystem mechanisch von den Quadrupolen entkoppelt ist. Die in der Vergangenheit beobachtete horizontale Bewegung des Strahls wird damit reduziert. Zusätzlich haben alle Sextupolmagnete neue mechanische Unterstüützungen bekommen, die eine präzisere Ausrichtung der Magnete erlauben. Das komplette Wasserkühlungssystem, einschließlich Rohren, Pumpen und Kontrollsystemen, wurde erneuert. Die „Bypass“ Wiggler Vakuumkammern haben zusätzliche Titan Sublimationspumpen erhalten, was zu einer Verbesserung des Vakuums in diesem Bereich führen wird.

Im Berichtsjahr wurde das sehr erfolgreiche Experiment NIKOS zur „Intravenösen Koronarangiographie“ beendet. Über fast 20 Jahre verteilt haben insgesamt 14 Mediziner vom Universitäts-Krankenhaus Hamburg-Eppendorf und der Herzkranklinik Bad Bevensen sowie 35 Physiker, Computerspezialisten und Ingenieure von DESY-HASYLAB, der Universität Hamburg und der Universität Siegen an diesem spannenden interdisziplinären Projekt gearbeitet.

Darüber hinaus hat die DESY-Maschinengruppe eine Durchführbarkeitsstudie für einen kleinen Speicherring

vorgelegt, der nahe an einem Krankenhaus installiert und ausschließlich für Koronarangiographie benutzt werden könnte. NIKOS, das zur Abbildung von Herzkranzgefäßen keinen Katheter für die Zufuhr von Kontrastmittel benötigt, wurde von allen Patienten sehr gut angenommen. Insgesamt wurden 379 Patienten untersucht, davon 230 im Rahmen der Validierung von NIKOS im Vergleich zur konventionellen selektiven Koronarangiographie.

Eine internationale Gruppe hochrangiger Kardiologen diskutierte die Ergebnisse der Studie und verglich NIKOS mit den anderen minimal- oder nicht-invasiven Methoden, die heutzutage zur Verfügung stehen, wie zum Beispiel MRI („Magnetic Resonance Imaging“) und EBCT („Electron Beam Computed Tomography“). Abschließend kann gesagt werden, dass zum jetzigen Zeitpunkt NIKOS bei weitem die besten Bilder liefert. Die Bilder sind innerhalb von Sekunden verfügbar und weitere technische Verbesserungen der Methode sind möglich.

Trotz der vergleichsweise hohen, mit NIKOS erreichten Bildqualität setzen die befragten Kardiologen ihre Hoffnungen in die Weiterentwicklung von MRI, da diese Methode im Prinzip nicht nur die Möglichkeit zur Darstellung der Morphologie der Herzkranzgefäße, sondern auch zur Überprüfung ihrer Funktion bietet. Bei all dem wird der Patient keiner Strahlenbelastung ausgesetzt. Im jetzigen Stadium von NIKOS empfehlen die an der Diskussion beteiligten Kardiologen das Verfahren noch nicht für den Routinebetrieb in Krankenhäusern. Statt dessen befürworten sie weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an NIKOS. DESY wird diese Arbeiten im Rahmen des Möglichen unterstützen, wenn dabei in naher Zukunft eine Gruppe von Kardiologen die Federführung übernimmt.

Der HASYLAB Jahresbericht 2000 ist wie im vergangenen Jahr wieder als CD-ROM und im Internet veröffentlicht. Nur eine begrenzte Anzahl von gedruckten Exemplaren steht zur Verfügung. Der Jahresbericht enthält 700 Berichte über Experimente, die im Jahr 2000 am HASYLAB durchgeführt wurden, einschließlich der Arbeiten zur Strukturbiologie. Die Liste der Institute, die an der Vorbereitung und Durchführung von Experimenten am HASYLAB beteiligt waren, enthält 232 Institute und etwa 1450 Wissenschaftler. Auf dem Gebiet der Strukturbiologie benutzten zusätzlich etwa

460 Wissenschaftler aus mehr als 100 Instituten, hauptsächlich aus Europa, die EMBL Messplätze und die Infrastruktureinrichtungen bei DESY.

## Strukturbestimmung von Systemen ohne Fernordnung

Synchrotronstrahlung im Energiebereich von etwa 80 bis 200 keV zeichnet sich durch eine hohe Eindringtiefe und eine hohe Realraumauflösung für Strukturbestimmungen von Systemen ohne Fernordnung aus. Oberhalb der K-Kanten nimmt der Absorptionsquerschnitt in etwa mit  $E^3$  ab und ist im genannten Energiebereich daher um drei Größenordnungen gegenüber konventioneller Röntgenstrahlung reduziert. Streuung wird dadurch wie in der Neutronenstreuung gegenüber (photoelektrischer) Absorption dominant. Die weiter unten behandelten Beispiele illustrieren diese Eigenschaften.

Energiereiche Strahlung wurde erstmalig 1986 zur Untersuchung von molekularen Flüssigkeiten eingesetzt. Als Strahlungsquelle wurde in diesen ersten Experimenten eine radioaktive Quelle ( $^{243}\text{Am}$ ) eingesetzt. Wegen des geringen Flusses dieser Quellen war die typische Messzeit in diesen Pionierexperimenten einige Monate. Synchrotronstrahlung wurde für diese Art von Experimenten erstmals am HASYLAB eingesetzt. Typische Messzeiten für Strukturfunktionen flüssiger und amorpher Systeme in exzellenter statistischer Genauigkeit betragen einige Stunden.

Die statische Struktur eines Ensembles von klassischen Teilchen, die über dasselbe Potential in Wechselwirkung treten, ist unabhängig von der Masse der Teilchen. Molekulare Flüssigkeiten, die sich nur in der Isotopen-Zusammensetzung unterscheiden, sollten also dieselbe Struktur haben. Diese Eigenschaft nutzt man zur Interpretation von Neutronen-Streuexperimenten aus. Präzise Messungen mit energiereichen Photonen können klären, wieweit die Annahme der Strukturgleichheit tragfähig ist. Unterschiedliche Isotope desselben Elements streuen elektromagnetische Strahlung in sehr guter Näherung gleich, Neutronen dagegen unterschiedlich.

Abbildung 67 zeigt den Unterschied im molekularen differentiellen Streuquerschnitt von leichtem ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und schwerem ( $\text{D}_2\text{O}$ ) Wasser gleicher Temperatur für Photonen, gemessen an den Messständen BW5/HASYLAB

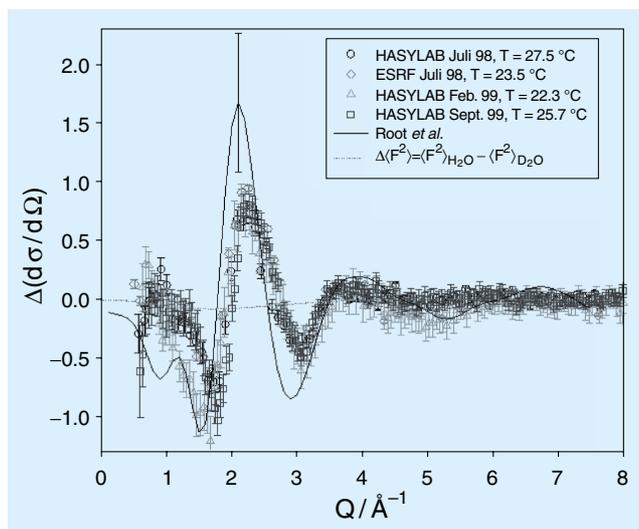


Abbildung 67: *Effekt des Proton/Deuteron-Austauschs auf die Struktur des flüssigen Wassers. Die durchgezogene Linie stammt aus alten Messungen mit Am-Quelle.*

und ID15/ESRF. Der gemessene differentielle Streuquerschnitt zeigt Unterschiede von etwa 2% im Maximum des Gesamtsignals. Die Annahme der Strukturgleichheit ist also nur eingeschränkt gültig. Deswegen ist entweder die Näherung von Wassermolekülen als klassische Teilchen bei Raumtemperatur korrekturbedürftig, oder die Wechselwirkung erfolgt nicht über dasselbe Potential. Tatsächlich sagen semi-quantenmechanische Pfadintegral-Rechnungen Strukturänderungen in der gemessenen Größenordnung voraus. Die Übereinstimmung mit allen Modellen ist jedoch schlechter als die Genauigkeit der Messung. Experimentell können also die Grenzen der verwendeten Potentialmodelle festgelegt werden.

Leichtes und schweres Wasser gleicher Temperatur haben unterschiedliche Struktur. Die Frage stellt sich, ob der Strukturunterschied durch einen Temperaturunterschied ausgeglichen werden kann, etwa um Neutronen-Streuexperimente an strukturgleichen Flüssigkeiten durchführen zu können. Es zeigt sich, dass D<sub>2</sub>O bei 30°C in etwa die gleiche Struktur hat wie H<sub>2</sub>O bei 24°C. Die zahlenmäßige Gleichheit mit dem Temperaturunterschied der Dichtemaxima in D<sub>2</sub>O und H<sub>2</sub>O legt die Vermutung nahe, dass diese Effekte in Beziehung stehen. Tatsächlich zeigte sich jedoch, dass isotonen-induzierte Strukturänderungen auch in Systemen ohne Dichtemaximum wie Benzol vorkommen. Man findet

bei tieferen Temperaturen auch noch deutlich größere Isotopeneffekte, etwa in Methanol bei 193 K kurz oberhalb des Schmelzpunktes. Quantenmechanische Rechnungen nach dem CP-MD Ansatz werden zum vollen Verständnis dieses Effektes beitragen.

Die hohe Eindringtiefe von energiereicher Synchrotronstrahlung ermöglicht es, bei Systemen, die schwerere Elemente enthalten, dieselben Proben mit Neutronen und elektromagnetischer Strahlung zu untersuchen. Ein typisches Beispiel sind Salzschnmelzen, etwa die ZnCl<sub>2</sub> Schmelze, von der im Folgenden die Rede ist, aber auch Gläser, Glasschnmelzen, amorphe Metalle, nanokristalline Materialien und Schwerionen enthaltende Lösungen, kurz die ganze Welt der anorganischen Chemie.

Schweratome enthaltende Flüssigkeiten und Gläser sind wegen der Absorption mit den häufig verwendeten Röntgenenergien um 8–20 keV nur in Reflexionsgeometrie zu untersuchen. Das Signal ist dann von einer etwa 1 μm dicken Oberflächenschicht dominiert. Dies birgt experimentelle Probleme, wenn die Oberfläche zur Kontamination neigt. Aber auch Datenauswertungsprobleme treten auf, da die mit dem Einfallswinkel variierende Eindringtiefe korrigiert werden muss. Die in Abbildung 68 gezeigten Unterschiede im differentiellen Streuquerschnitt der Zinkchloridschnmelze gehen auf diese Effekte zurück. Es gibt keinen Zweifel, dass Neutronen und energiereiche Synchrotronstrahlung in Transmission auf Oberflächeneffekte unempfindlich sind. Durch Kombination der Informationen dieser beiden Messsonden kann selektive Strukturinformation gewonnen werden, und zwar an derselben Probe, also ohne die Annahme der Strukturgleichheit von isotonenmarkierten Verbindungen benutzen zu müssen, denn das Streuvermögen der Atome für diese Strahlungsarten ist unterschiedlich.

Unter bestimmten Voraussetzungen ist dann die Rekonstruktion der dreidimensionalen Struktur möglich. Abbildung 69 zeigt das Tetraedernetzwerk der Zinkchloridschnmelze. Es handelt sich um eine Momentaufnahme aus einer Monte Carlo-Simulation mit nach dem Levesque-Weiss-Reatto Algorithmus invertierten Potentialen. Ein solches Netzwerk bildet sich in anderen tetraedrisch koordinierten Salzschnmelzen nicht und erklärt die ausgeprägte Tendenz der Zinkchloridschnmelze, glasartig zu erstarren.

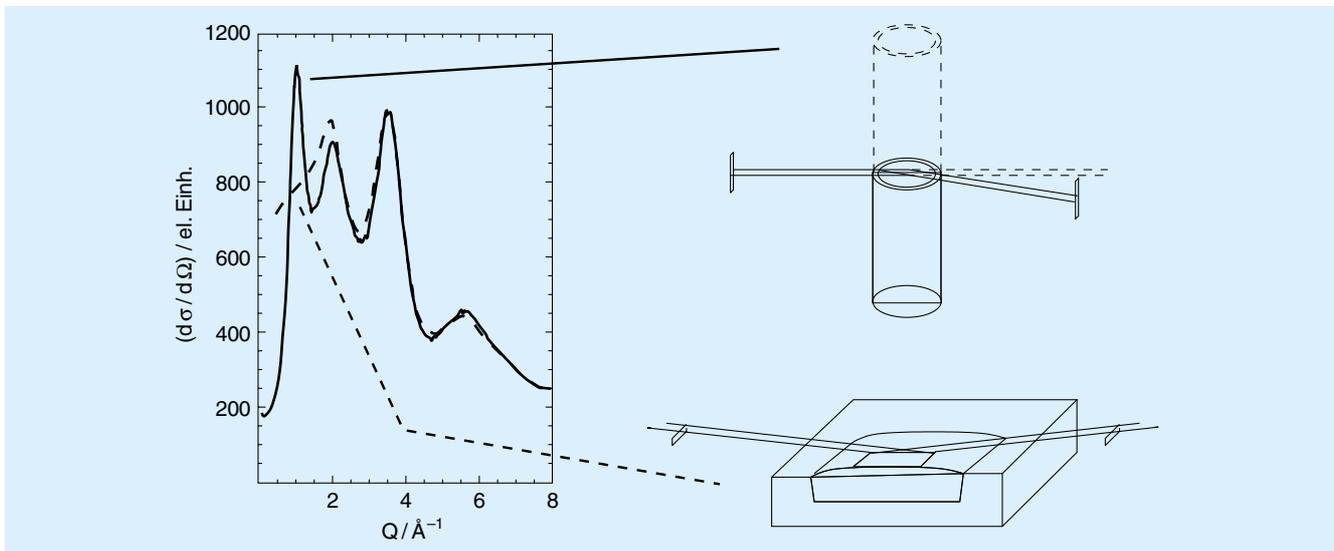


Abbildung 68: Unterschiede des differentiellen Streuquerschnittes von Zinkchloridschmelze in unterschiedlichen Streugeometrien (rechts angedeutet). Durchgezogene Linie: Transmissionsgeometrie bei einer Energie von 100 keV, unterbrochene Linie: Reflexionsgeometrie bei 17.4 keV.

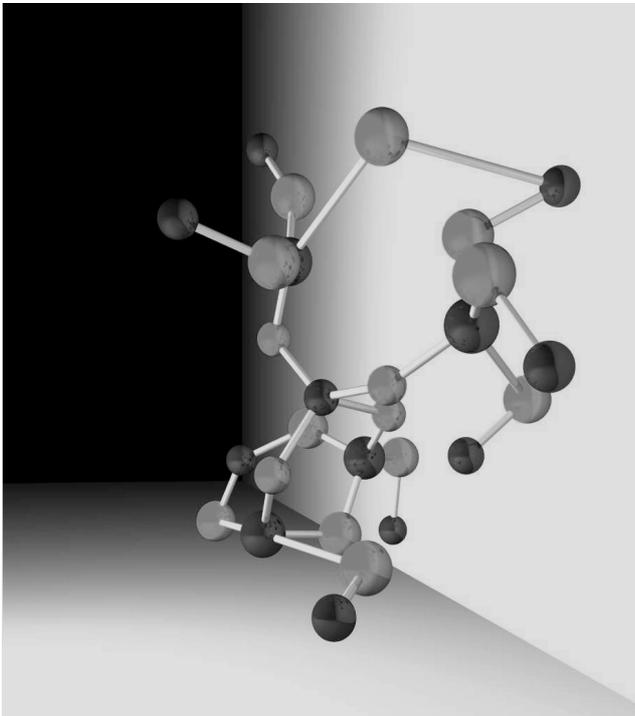


Abbildung 69: Ausschnitt aus der dreidimensionalen Struktur der Zinkchloridschmelze: Die helleren Kugeln entsprechen den Chlor-, die dunklen den Zinkatombestellungen.

## Neue Struktur in Absorptionsspektren

Bei Wellenlängen um 0.1 nm bestimmen Photoionisationsprozesse die Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlen und Materie. So genannte Absorptionskanten sind in Proben sichtbar, wenn die Energie des einfallenden Röntgenstrahls gleich der Bindungsenergie der in den Atomen gebundenen Elektronen ist. Bei höheren Energien als die Bindungsenergie weisen die Absorptionskanten im Absorptionsspektrum feine Strukturen auf, so genannte „X-Ray Absorption Fine Structures“ (XAFS). XAFS ist durch die elektronischen und geometrischen Eigenschaften der Probe in der Umgebung der absorbierenden Atome bestimmt. Der oszillierende Anteil von XAFS (EXAFS) wird routinemäßig zur Bestimmung geometrischer Strukturen benutzt. Die Oszillationen, EXAFS, entstehen durch Interferenz der direkt ausgestrahlten Elektronenwellen und ihrer Rückstreuung an anderen Atomen in der Probe.

Bei HASYLAB wurden im Absorptionsspektrum neue feine Strukturen (0.01% der totalen Absorption) entdeckt und erstmals präzise vermessen. Diese neuen Strukturen sind durch Interferenzen im Anfangszustand

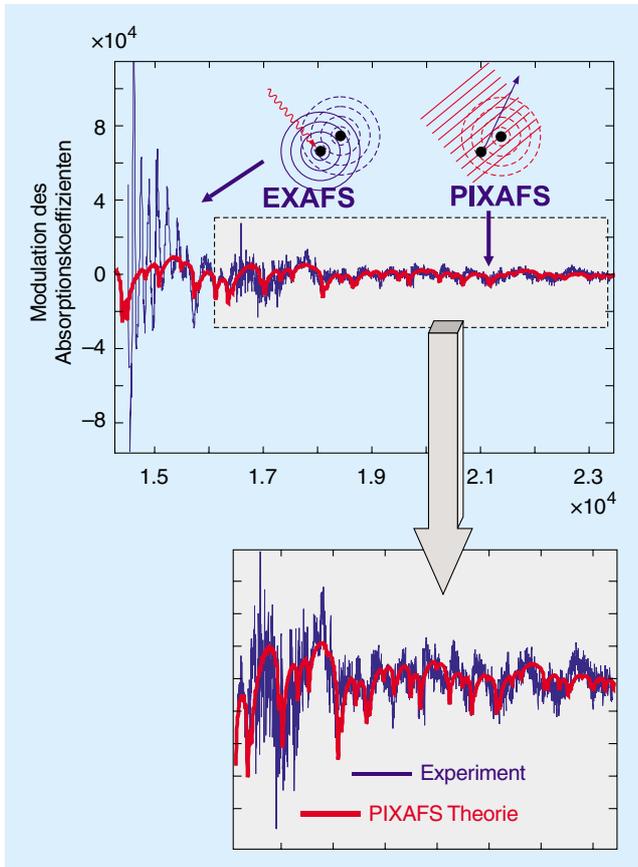


Abbildung 70: Absorptionsspektrum von Pt Pulver, in dem EXAFS und PIXAFS Signale erkennbar sind. Rote Linien: Ergebnisse der theoretischen Simulationen für PIXAFS.

der Photonen verursacht. Sie erhielten darum den Namen PIXAFS (Photon-Interferenz-XAFS). Die direkte Absorption wird durch die Streuung der einfallenden Röntgenstrahlung an anderen Atomen in der Probe modifiziert.

Abbildung 70 zeigt das für ein Pt Pulver gemessene Absorptionsspektrum. Bei niedrigen Energien sind nur die EXAFS Oszillationen zu sehen, die mit zunehmender Energie schnell gedämpft werden. Bei Energien größer als 16 keV überwiegt PIXAFS. Die Abstände zwischen den einzelnen Pt Atomen können aus PIXAFS Spektren über eine Fourier Transformation bestimmt werden (Abb. 71). Gegenüber EXAFS können mit PIXAFS in größeren Abständen auch die Atome noch untersucht werden.

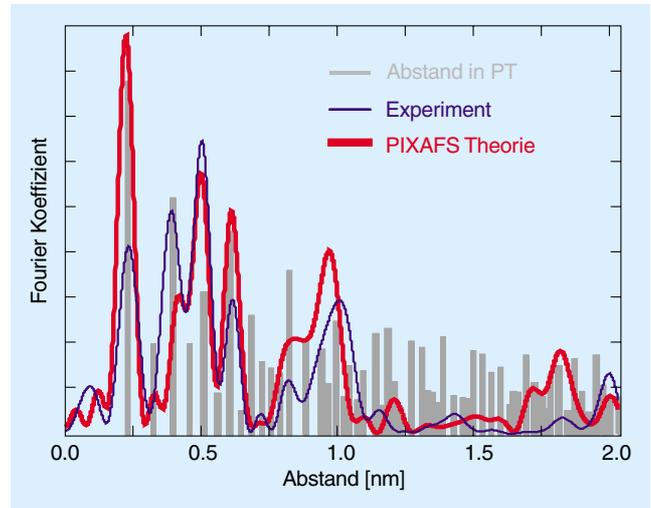


Abbildung 71: Die Fouriertransformation des Absorptionsspektrums.

### Direkte Abbildung atomarer Strukturen mit Synchrotronröntgenstrahlung

Röntgenstrahlen sind aufgrund ihrer kurzen Wellenlänge gut geeignet für die direkte Abbildung atomarer Strukturen. Die Auflösung heutiger Röntgenlinsen ist jedoch auf 10 nm begrenzt, so dass bis heute Röntgenstrahlen-Mikroskope mit atomarer Auflösung nicht gebaut werden konnten.

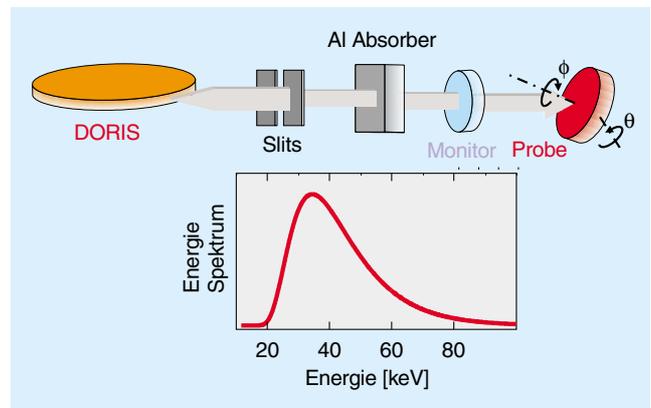


Abbildung 72: Skizze des experimentellen Aufbaus und das Energiespektrum des direkten Synchrotronstrahls, der mit einem Aluminium-Absorber geformt war.

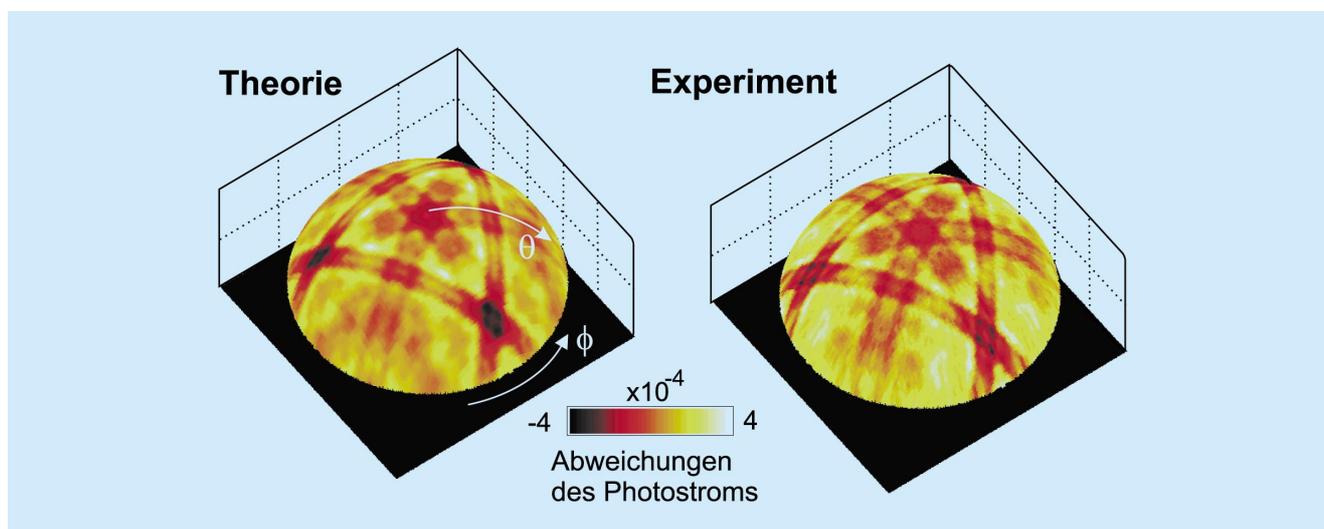


Abbildung 73: Direkte Realraum-Abbildungen einer Silizium-Probe, links aus theoretischen Simulationen und rechts aus Experimenten. Die Ergebnisse sind auf eine sphärische Fläche projiziert.

Mit ersten wichtigen Beiträgen von HASYLAB Wissenschaftlern wurde in den letzten Jahren ein alternatives linsenfreies Verfahren entwickelt, nämlich die Röntgenholographie mit internen Quellen. Diese Methode vermeidet optische Elemente und ermöglicht dadurch atomare Auflösung.

In der Röntgenholographie dienen einzelne emittierende Atome in der Probe als Quellen oder als Detektoren für monochromatische Röntgenstrahlung, die wiederum an anderen Atomen in der Probe gestreut wird. Das Streubild ist interpretierbar als ein Gabor Hologramm der kristallinen Struktur in der Umgebung der emittierenden Atome der Probe. Die dreidimensionale Anordnung dieser Atome kann dann aus dem Gabor Hologramm durch einen der Fouriertransformation ähnlichen Algorithmus rekonstruiert werden.

Die atomare räumliche Auflösung und eine fehlerfreiere Rekonstruktion des Realraums können mit Röntgenholographie nur erreicht werden, indem die Hologramme über große Streuwinkel und große Energiebereiche gemessen werden. Das holographische Signal ist jedoch sehr schwach. Aufgrund der schwachen Streuung von Röntgenstrahlen beträgt es nur 0.1% des gesamten gemessenen Signals. Darum ist die Rönt-

genholographie sehr zeitaufwändig, und sie setzt die stärksten verfügbaren Undulatoren voraus.

Im Berichtsjahr ist es bei HASYLAB gelungen, ein Bild der atomaren Struktur von Silizium als Teststruktur direkt zu messen und die Schwierigkeiten der holographischen Methode zu umgehen mit Hilfe der „weißen“ Synchrotronstrahlung von konventionellen Krümmungsmagneten. Bei dieser Methode dienen einzelne absorbierende Atome in der Probe als Detektoren für das Interferenzfeld des einfallenden polychromatischen Röntgenstrahls und des an anderen Atomen in der Probe gestreuten Röntgenlichts.

Das Interferenzfeld ist messbar über den inneren Photostrom, wenn die Probe um zwei Achsen gedreht wird (Abb. 72), und die atomare Struktur, hier von Silizium, ist ohne Fouriertransformation als zweidimensionales Bild direkt erkennbar, da das Bild mit Hilfe longitudinal inkohärenter „weißer“ Röntgenstrahlung erzeugt wurde.

In Abbildung 73 ist die experimentell gewonnene, direkte Abbildung dem aus theoretischen Simulationen abgeleiteten Bild gegenüber gestellt. Die beiden Bilder stimmen gut überein, obwohl das Signal extrem klein ist. Für Strukturuntersuchungen der lokalen Umgebung der absorbierenden Atome in der Probe wird ein „low-pass“ Filter auf die direkten Bilder angewendet (Abb. 74).

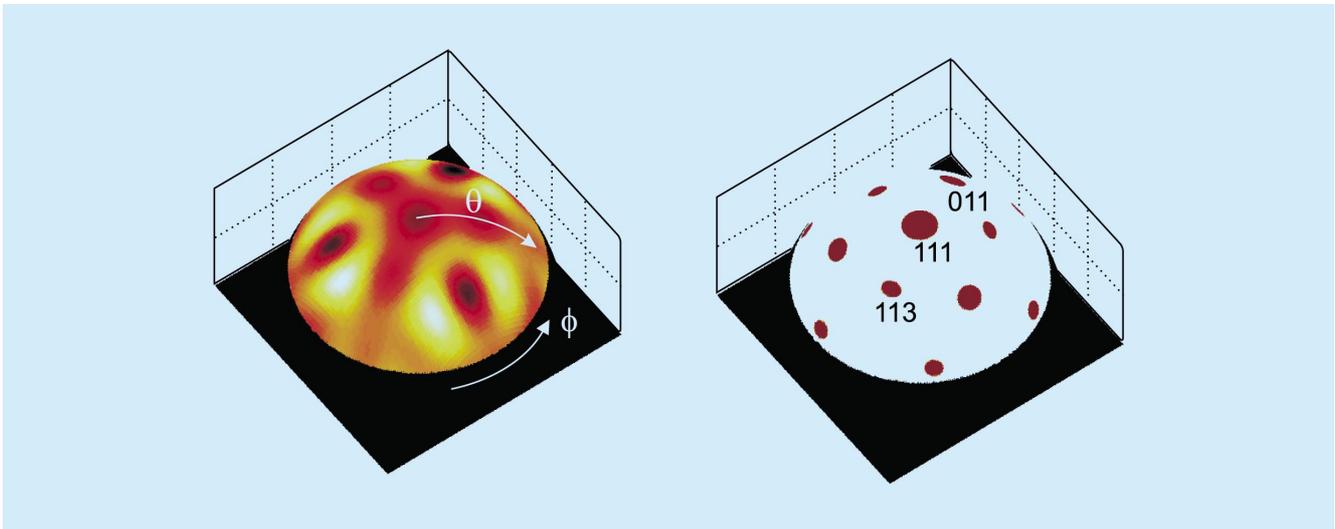


Abbildung 74: Links: Das gefilterte Realraum-Bild stellt die lokale Umgebung der absorbierenden Atome dar. Die dunklen Gebiete entsprechen den einzelnen Si-Atomen, die rechts skizziert sind.

## Intravenöse Koronarangiographie

Seit 1981 wurde bei HASYLAB das NIKOS-System für intravenöse Koronarangiographie entwickelt. Im Jahre 2000 wurde das Projekt erfolgreich abgeschlossen, nachdem insgesamt 379 Patienten untersucht worden waren.

Die Entwicklung des Systems war ein kontinuierlicher Prozess. Verschiedene Versionen wurden getestet und für die Untersuchungen von Patienten eingesetzt. Die meisten Patienten, nämlich 303, wurden mit der Version IV des Systems (Abb. 75) untersucht, das seit Ende 1996 installiert ist. Verglichen mit Systemen in anderen Instituten wie NSLS, ESRF oder KEK ist das NIKOS(IV)-System das am weitesten entwickelte und somit das weltweit führende System für intravenöse Koronarangiographie.

Als bildgebendes Verfahren für die Methode wurde die Dichromographie gewählt, bei der zwei Bilder gleichzeitig mit monochromatischer Röntgenstrahlung aufgenommen werden. Die Energien der beiden Strahlen werden dabei so gewählt, dass sie unterhalb und oberhalb der Absorptions-K-Kante des Kontrastmittels liegen, das heißt normalerweise an der K-Kante von Jod bei 33.17 keV. Durch logarithmische Subtraktion der bei-

den Bilder wird der Kontrast des Kontrastmittels erheblich verstärkt, während der von Gewebe und Knochen unterdrückt wird. Auf diese Weise können sehr geringe Kontraste sichtbar gemacht werden, auch das sehr stark verdünnte Kontrastmittel nach intravenöser Injektion. Um qualitativ hochwertige Subtraktionsbilder zu erhalten, muss der Energieunterschied der beiden monochromatischen Strahlen gering sein, maximal 300 eV, das heißt die Bandbreite der monochromatischen Strahlen darf nicht größer als 250 eV sein.

Um die Untergrundstreuung in den Bildern zu reduzieren und um das System optimal an die Strahlbedingungen eines Speicherrings anzupassen, wurde das NIKOS-System als „Linescan“-System konzipiert. Andererseits wollen die Mediziner ein Bild innerhalb eines Viertels des Herzzyklus aufnehmen, damit sie durch EKG-Triggerung die günstigste Herzphase für die Aufnahme auswählen können.

Um beide Anforderungen zu erfüllen, müssen  $3 \times 10^{11}$  Photonen/(s mm<sup>2</sup>) in den monochromatischen Strahlen verfügbar sein. Das NIKOS(IV)-System ist das einzige, das diese Bedingung erfüllt.

Das System besteht im Wesentlichen aus dem Monochromator, dem Sicherheitssystem, einer Scan-Einrichtung mit Patientenstuhl und dem Detektor. Es

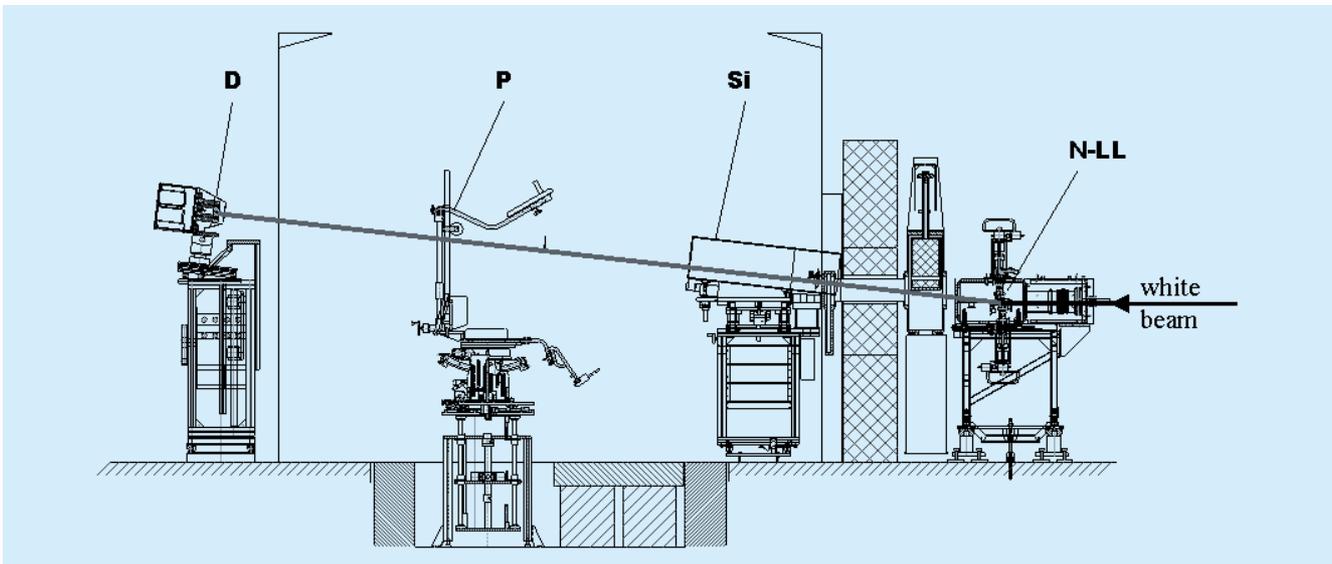


Abbildung 75: Schema des NIKOS(IV)-Systems (N-LL = Monochromator, Si = Sicherheitssystem, P = Patientenstuhl, D = Detektor).

ist an der Wiggler-Strahlführung W2 des DORIS-Speicherrings (4.5 GeV) aufgebaut. Der dort installierte HARWI-Wiggler ist mit 1.26 T, was einer kritischen Energie von 17 keV entspricht, für diese Anwendung optimiert. Bei einem Maschinenstrom in DORIS von 150 mA hat er eine Leistung von 6 kW. Bereits bei 54 mA Maschinenstrom sind monochromatische Strahlen mit  $3 \times 10^{11}$  Photonen/(s mm<sup>2</sup>) verfügbar. Da der Speicherring normalerweise mit einem Strom zwischen 80 und 150 mA läuft, sorgt ein Spaltsystem dafür, dass die Hautdosis bei den Patienten einen Maximalwert von 220 mGy nicht überschreitet. Das ist deutlich niedriger als der Mittelwert von 410 mGy für konventionelle selektive Koronarangiographie. Die berechnete maximale effektive Dosis beträgt für das NIKOS-System sogar nur 2.2 mGy für Männer bzw. 4.4 mGy für Frauen.

Im He-gefüllten Tank des Monochromators sind zwei gebogene Si(111)-Kristalle in Laue-Geometrie für die zwei monochromatischen Strahlen eingebaut. Die Strahlen kreuzen sich beim Patienten und sind dort auf vertikal 0.5 mm fokussiert. Ein ausgeklügeltes Design der Mechanik und der Kühlung sorgt dafür, dass der Monochromator trotz der Wärmelast problemlos zwei 13 cm breite, sehr geradlinige Strahlen am Ort des Detektors 5.8 m dahinter liefert.

Im Sicherheitssystem sind drei voneinander unabhängige sehr schnelle röntgendichte Strahlverschlüsse eingebaut, wovon zwei nur vom Patientenstuhl und ohne Rechner gesteuert werden. Bei jedem nur denkbaren Fehler, der zu einer Erhöhung der Strahlenexposition des Patienten oder des Arztes führen könnte, schließen diese Verschlüsse innerhalb von 8 ms. Das garantiert unter anderem, dass die Hautdosis für den Patienten nie größer als 300 mGy sein kann.

Die Scan-Einrichtung ist außerordentlich kompakt und besteht aus drei Teilen: einem hydraulischen Antrieb, mit dem eine konstante vertikale Bewegung von 50 cm/s erreicht wird, einem mechanischen System für die Justierung des Patienten und dem Sitz für den Patienten.

Als Zwei-Zeilen-Detektor wird eine 13 cm breite, ortsaufauflösende Ionisationskammer eingesetzt. Sie ist mit 90% Kr und 10% CO<sub>2</sub> bei 13.5 bar gefüllt. Der sehr hohe dynamische Bereich kann in vier Stufen an die Absorption des jeweiligen Patienten angepasst werden. Je nach Stufe liegt der gemessene dynamische Bereich zwischen 191 000:1 und 328 000:1 und das photonenäquivalente Rauschen zwischen 3.1 und 14.8 Photonen. Der Detektor verfügt nicht nur über diese sehr hohe Empfindlichkeit, sondern ist auch noch sehr schnell. Das Auslesen der zwei Zeilen mit jeweils 336 Pixeln von

0.4 mm Breite dauert zwischen 0.17 und 0.23 ms. Diese außergewöhnlich guten Parameter des Detektors sind für die Methode notwendig, damit einerseits ein Bild innerhalb eines Viertels des Herzzyklus aufgenommen werden kann, und andererseits die schwachen Kontraste von 1 mm starken Strukturen mit einer Massendichte von nur 1.5 bis 3.0 mg/cm<sup>2</sup> sowohl hinter Lungen als auch hinter Knochen noch dargestellt werden können.

Die Steuerung des Systems erfolgt über mehrere spezielle VME-Einschübe. Für Datenspeicherung, Bildverarbeitung und -darstellung wird eine Alphastation 400 4/233 eingesetzt. Ein komfortables, schnelles und leicht zu bedienendes Software-Paket erlaubt dem Arzt, die Diagnose innerhalb weniger Minuten nach der Untersuchung zu stellen.

230 der insgesamt 379 untersuchten Patienten gehörten zu einer Patienten-Studie mit festem Protokoll. Während der Studie wurden keine Veränderungen am System vorgenommen. Ziel der Studie war die Validierung der NIKOS-Methode, wobei die konventionelle selektive Koronarangiographie als „Goldener Standard“ angenommen wurde. Die Hypothese war, dass die intravenöse Koronarangiographie für Nachsorge-Patienten ausreichende diagnostische Bildqualität liefern kann.

88% der Patienten waren Männer und 12% Frauen. Das Alter lag zwischen 36 und 81 Jahren (im Mittel 61 Jahre) und das Gewicht zwischen 50 und 120 kg (im Mittel 81 kg). 53 der Patienten hatten vorher eine Bypass-Operation und 165 eine Ballon-Dilatation, wobei in 72% der Fälle ein Stent (Gefäßstütze) eingesetzt worden war. In der Regel wurden für jeden Patienten zwei Projektionswinkel für unterschiedliche Zielgefäße eingestellt. Diese teilten sich auf in 35% Ramus interventricularis anterior (LAD), 25% rechte Herzkranzarterie (RCA), 22% Ramus circumflexus (Cfx) und 18% Bypässe. In 94% der Untersuchungen wurden 30 ml Kontrastmittel in die Armvene injiziert und in 6% in die obere Hohlvene.

Während der Studie wurden täglich bis zu 6 Patienten mit dem NIKOS-System untersucht. Es traten keine Komplikationen auf. Abbildung 65 zeigt beispielhaft einige intravenöse Angiogramme. 60 der 230 Patienten hatten außer der NIKOS-Untersuchung innerhalb von 2 Monaten auch eine Untersuchung mit selektiver Koronarangiographie. Die Angiogramme dieser Patienten wurden intraindividuell verglichen. Einige unab-

hängige Kardiologen, die die NIKOS-Methode vorher nicht kannten, stellten anhand der intravenösen Angiogramme Diagnosen. Dazu wurden die Arterien in jeweils drei Segmente unterteilt, und die Kardiologen mussten angeben, ob eine Stenose > 70% im Segment vorliegt oder nicht. Zwei weitere Kardiologen beurteilten auf die gleiche Weise die selektiven Aufnahmen. Obwohl sie nur 63% Übereinstimmung bei stenosierten Segmenten hatten, mussten diese Ergebnisse als „Goldener Standard“ zum Vergleich herangezogen werden. Die unabhängigen Gutachter erreichten einen positiv-prädiktiven Wert von bis zu 83% für alle Zielgefäße (Mittel aller Gutachter 64%) und einen negativ-prädiktiven Wert von im Mittel 96%. Das zeigt den Trend, dass der Grad der Stenosen mit dem neuen Verfahren oft unterschätzt wurde. Trotzdem wurden praktisch alle Stenosen in den NIKOS-Angiogrammen gefunden.

18% der Segmente konnten nicht beurteilt werden. Eine sorgfältige Analyse der Daten und Bilder zeigte, dass der Anteil der nicht-beurteilbaren Segmente noch erheblich gesenkt werden könnte auf etwa 5%, hauptsächlich durch Änderungen bei der Prozedur während der Untersuchung, teilweise auch durch kleine Änderungen am System. Entsprechend könnten die prädiktiven Werte, die Sensitivität und die Spezifität der Methode verbessert werden.

Die meisten Probleme traten bei der Cfx und beim Hauptstamm durch Überlagerungen mit großen jodgefüllten Strukturen wie Aorta und linkem Ventrikel auf. In diesen Fällen können Bildverarbeitungsmethoden wie „Unsharp Masking“ die Diagnosen verbessern bzw. ermöglichen (Abb. 65f).

Die NIKOS-Methode muss nicht nur mit der selektiven Koronarangiographie verglichen werden, sondern auch mit konkurrierenden nicht-invasiven bzw. minimal invasiven Methoden wie „Magnetic Resonance Imaging“ (MRI – Kernspintomographie) oder „Electron Beam Computed Tomography“ (EBCT).

Anders als bei selektiver Koronarangiographie sind alle drei Verfahren risikolos für die Patienten und können ambulant durchgeführt werden. Allerdings ist die Bildqualität schlechter, es können keine Bildsequenzen aufgenommen werden und Interventionen sind nicht sofort im Anschluss an die Untersuchung möglich.

In den meisten Vergleichsstudien für MRI und EBCT gibt es keine Angaben für die prädiktiven Werte. Deshalb müssen Sensitivität und Spezifität verglichen werden. Alle drei Methoden ergeben vergleichbare Ergebnisse, wenn alle Arterien eingeschlossen werden, auch die nicht-beurteilbaren. Die Werte für die Sensitivität sind:

NIKOS	23% bis 77%	
EBCT	59% bis 69%	
MRI	38% bis 90%	(ohne nicht-beurteilbare, da Zahl nicht veröffentlicht)

und für die Spezifität:

NIKOS	85% bis 92%	
EBCT	63% bis 76%	
MRI	82% bis 97%	(ohne nicht-beurteilbare).

Dabei sind bei NIKOS alle Segmente der Herzkranzgefäße, Seitenäste und Bypässe enthalten, bei MRI und EBCT dagegen nur die proximalen und mittigen Segmente der Hauptgefäße. Grund dafür ist, dass NIKOS bessere Bildqualität als MRI und EBCT liefert. Mit NIKOS lassen sich Gefäße mit 0.8 mm Durchmesser darstellen, mit MRI und EBCT nur mit 2 bis 3 mm Durchmesser.

Außerdem liefert NIKOS sehr gute Bilder von Stents und Bypassen. MRI dagegen kann diese nicht darstellen, weil Metall zu Auslöschungen in den Bildern führt. EBCT kann Stents und Bypässe nur in wenigen speziellen Fällen abbilden. Deshalb ist NIKOS die optimale Methode für Stents und Bypässe.

Verglichen mit NIKOS und EBCT hat MRI den Vorteil, dass keine Röntgenstrahlung notwendig ist und dass nicht nur die Morphologie dargestellt wird, sondern auch die Funktion (Perfusion). Bei EBCT gibt es zusätzliche Probleme, wenn Stenosen von Kalzium überlagert werden. Außerdem wird bei MRI und EBCT von den Patienten eine erhebliche Kooperation verlangt und Arrhythmien führen zu Unschärfen in den Bildern. Das ist bei NIKOS nicht der Fall, und wegen der sehr einfachen Prozedur bei der Untersuchung hat das Verfahren eine sehr hohe Akzeptanz bei den Patienten.

Insgesamt hat jede der drei Methoden ihre Vor- und Nachteile und ihre Grenzen. Deshalb werden diese Methoden die selektive Koronarangiographie auch auf lange Sicht nicht ersetzen können. Jede Methode hat aber einen bestimmten Bereich, in dem sie optimal angewendet werden kann. Für NIKOS ist dieser Bereich offensichtlich die Kontrolle von Stents und Bypassen.

Mit diesen Erkenntnissen ist die Phase der Entwicklung und die Testphase der Methode und des Systems abgeschlossen. In der nächsten Phase muss jetzt geprüft werden, ob die Methode in klinische Routine übernommen werden soll und kann. Anders als bei MRI und EBCT gibt es bisher keine kommerziellen Systeme für NIKOS. Deshalb wurde bei DESY eine Machbarkeitsstudie für eine kompakte Quelle auf der Basis eines Speicherrings erstellt. Dieser Ring hat einen Durchmesser von 21 m und zwei Untersuchungsplätze. Die Studie kann als Grundlage für einen endgültigen industriellen Entwurf dienen.

Die Quelle müsste in einem medizinischen Zentrum installiert werden. Unter der Voraussetzung, dass jährlich 7500 Patienten untersucht werden, würde eine Untersuchung mit der NIKOS-Methode etwa die Hälfte einer Untersuchung mit konventioneller selektiver Koronarangiographie kosten.

Im Jahr 1998 wurden in Deutschland 528 000 selektive Koronarangiographien durchgeführt, 30% davon waren Kontrollen. Angenommen, 72% der Kontrollen wären wie bei der DESY-Studie Stent-Kontrollen, dann gäbe es etwa 110 000 Kandidaten für eine Untersuchung in dem medizinischen Zentrum. Eine weitere sehr interessante Anwendung des NIKOS-Verfahrens wäre die postoperative Kontrolle von Bypassen. Diese Kontrolle wird heute in der Regel nicht durchgeführt, es gäbe aber 6 000 bis 12 000 Kandidaten für die Untersuchung.

Trotzdem ist nicht sicher, ob diese zwei Anwendungen ausreichen, um jährlich 7500 Patienten in einem neu zu errichtenden Zentrum untersuchen zu können. Die Zukunft der Methode hängt davon ab, ob sich eine größere Gruppe von Medizinern findet, die ein starkes Interesse an der Einführung des Verfahrens hat, und außerdem ein Investor, der bereit ist, ein solches Zentrum aufzubauen.

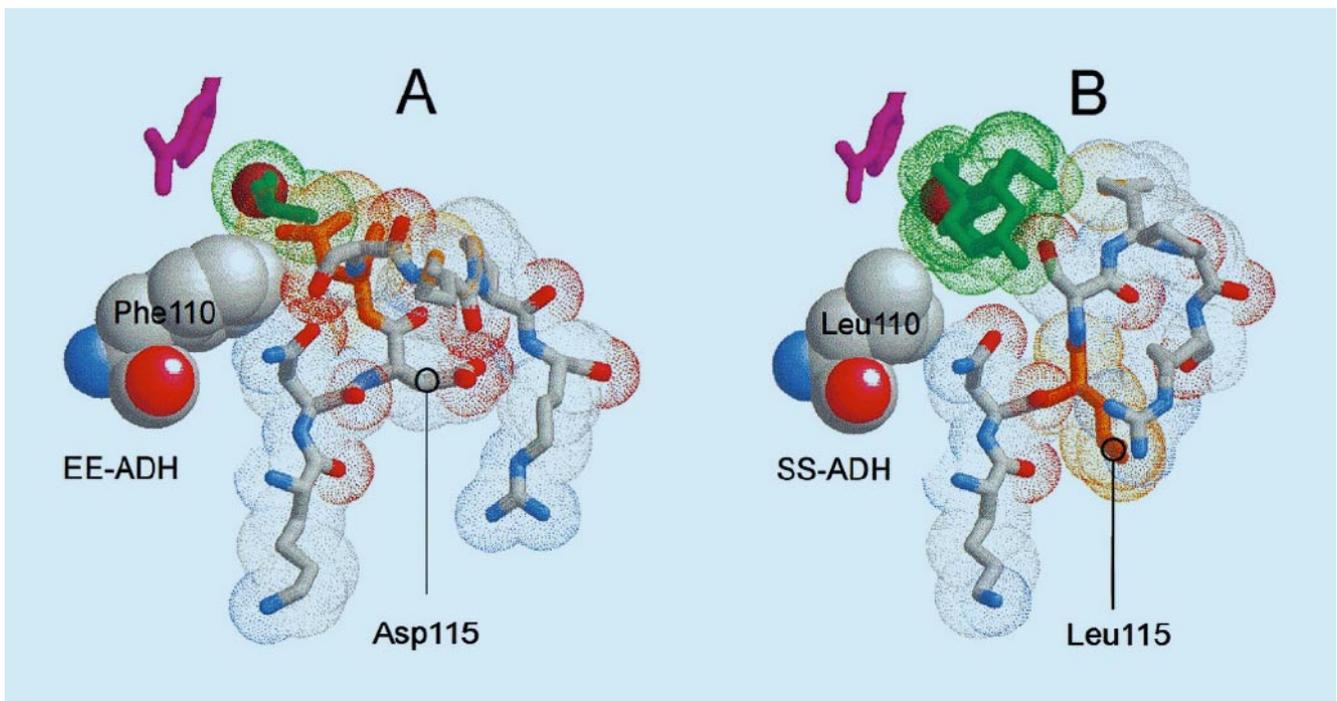


Abbildung 76: Der Eingang zu der zentralen Kammer des Substratkanals in EE- und SS-ADH. (A) Der EE-ADH-NADH-DMSO-Komplex mit einer Auflösung von 1,8 Å. Der Dihydropyridinring ist purpur und DMSO grün. LeuEE116 ist der nächste Nachbar zu DMSO und PheEE110 blockiert den Zugang zum Inneren des Substratkanals. (B) Dieselbe Region im SS-Isozym. LeuSS115 übernimmt die Position des nicht mehr vorhandenen AspEE115 nach einer Strukturänderung in der Schlaufe. Die Mutation PheEE-110Leu vergrößert das aktive Zentrum und ermöglicht Bindung von Cholsäure, einem voluminösen Substrat.

# Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie EMBL –Außenstation Hamburg–

**Leitung:** M. Wilmanns

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

Im Laufe des Jahres 2000 wurden von EMBL Hamburg wieder sechs Messstationen betreut, davon vier für den Bereich der Biokristallographie und jeweils eine Messstation für Kleinwinkelstreuung an Biomakromolekülen und eine für biologische Röntgenabsorptions-Spektroskopie. Insgesamt wurden 310 Experimente von 134 Gruppen aus 20 Ländern durchgeführt. Die große Mehrzahl der Besucher konnte aus Mitteln des HPRI-Programms der Europäischen Union unterstützt werden.

Gleichzeitig wurde der Umbau der Messstation X13 (mit Unterstützung aus Mitteln des IMB Jena und der Universität Hamburg) fortgesetzt. Testergebnisse zeigten, dass der Photonfluss pro Fläche für diese Messstation besser ist als für die benachbarte Messstation X11.

Es wurden einige Testdatensätze von hoher Qualität gesammelt, die zeigten, dass die Anordnung der optischen Elemente an dieser neuen Messstation die Erwartungen vollständig erfüllt.

Gleichzeitig wurde die Umgestaltung der Messstation X12 mit wählbarer Energie/Wellenlänge für biokristallographische Experimente, einschließlich MAD-Experimente, geplant. In diesem Rahmen wurde ein neues Gesamtkonzept für den Fächer K ausgearbeitet, das eine symmetrische Anordnung der Messstationen X11 und X13 mit gleichem Winkel in Bezug auf den direkten Strahl (X12) ermöglichen wird. Mit den Umbauarbeiten wurde Ende des Jahres 2000 begonnen.

EMBL Hamburg nimmt eine wichtige Aufgabe im Bereich von fortgeschrittenem Training wahr. Seit 2000 wird die Außenstation als „Marie Curie Training Site“ von der Europäischen Union anerkannt. Dieses Programm ermöglicht die Vergabe von Stipendien (bis zu 12 Monaten) an Doktoranden/innen aus den EU-Mitgliedsländern einschließlich der assoziierten Staaten.

Parallel dazu werden weiterhin Trainingskurse angeboten. Die Mitgliedschaft in drei „Concerted Action“ Programmen der EU, Synchrotron-Rundtisch, MAX-INF und European Structural Biology Forum, ermöglichen die Bereitstellung von notwendigen finanziellen Ressourcen für diese Kurse.

Der sogenannte PEPSII Kurs mit dem Schwerpunkt auf Methoden der Probenvorbereitung (Expression, Reinigung und Kristallisation) fand letztes Jahr ein großartiges Echo.

Darüber hinaus wurde ein Workshop in Poznan (Polen) organisiert, bei dem Möglichkeiten für „High-Throughput“ Strukturbiologie diskutiert wurden.

## Forschungsschwerpunkte

In der letzten EMBL-Ratssitzung im November 2000 wurde das wissenschaftliche Programm für EMBL in den Jahren 2001 bis 2005 verabschiedet. Dieses Programm wird die Bemühungen von EMBL unterstützen, die Genom- und Proteom-orientierte Forschung in das Zentrum seiner wissenschaftlichen Aktivitäten zu setzen, die Messstationen mit „State-of-the-Art“ Standards weiterzuentwickeln und die Infrastruktur an der Außenstation so zu verbessern, dass diese eine wichtige Funktion als Einrichtung in den derzeit beginnenden Strukturgenomikprojekten einnehmen kann.

Eine verbesserte Form der Bereitstellung von Synchrotronstrahlung auf dem DESY-Gelände könnte helfen, Hamburg noch mehr als in der Vergangenheit zu einem multi-institutionellen Spitzenzentrum im Bereich der hochaufgelösten Strukturbiologie und der damit verbundenen Strukturgenomikprojekte zu entwickeln.

Im weiteren Teil des Berichtes sind die wissenschaftlichen Aktivitäten der Forschungsgruppen aus den Berei-

chen Instrumentierung, Biokristallographie, Kleinwinkelstreuung und Röntgenabsorptionsspektroskopie zusammengefasst.

Weitere Projekte in Zusammenarbeit mit auswärtigen Gruppen und Einzelheiten sind im EMBL Jahresbericht dargestellt ([http://www.embl-hamburg.de/annual\\_report\\_2000.html](http://www.embl-hamburg.de/annual_report_2000.html)).

## Instrumentierung der Synchrotron-Messstationen

Im Jahr 2000 bestand die Hauptaktivität im Umbau der Messstation X13, der ehemaligen Station für Kleinwinkelstreuung, in einen Messplatz für Proteinkristallographie (PX). Die im Vorjahr begonnenen Arbeiten wurden fortgesetzt, so dass Mitte des Jahres mit dem Testbetrieb begonnen werden konnte, und die letzte Strahlzeit bereits für regulären Nutzerbetrieb freigegeben war.

Im Folgenden sollen die Hauptmerkmale dieser Strahlung kurz aufgelistet werden:

- fixierte Wellenlänge von 0.9 Å, festgelegt durch die Strahlführungsgeometrie und einen fokussierenden Si(220) Monochromator,
- Rh-beschichteter 1 m langer Röntgenspiegel zur dynamischen Fokussierung in vertikaler Richtung und zur Unterdrückung harmonischer Wellenlängen,
- bei EMBL entwickelte kristallographische Messstation mit CCD-Detektor, Kristallkühlung und  $\phi$ -Rotation.

Der Einsatz eines kontinuierlichen Spiegels, anstatt des bisher verwendeten segmentierten Spiegels, war mit einem beträchtlichen Intensitätsgewinn am Probenort verbunden. Die Umstellung der gesamten Experimentsteuerung von CAMAC auf ein PC-basiertes System und der Einsatz eines modernen Schrittmotorsystems wirkten sich positiv sowohl auf die Zuverlässigkeit als auch auf die Bedienerfreundlichkeit aus.

Im Winter Shutdown 2000/01 wurde der gesamte Strahlfächer K inklusive der Experimentierhütten abgebaut. Zusätzlich zu den bereits bestehenden Messplätzen X11 und X13 wird zwischen diesen beiden Strahlen eine Messstrecke mit variabler Wellenlänge aufgebaut, an der anomale Dispersionseffekte ausgenutzt werden

sollen (MAD). Im Rahmen der Umbaumaßnahmen werden die teilweise veralteten Komponenten von X11 auf den Stand von X13 gebracht.

## Biokristallographie

### Substratspezifität von Alkohol Dehydrogenase Isozymen aus Pferdeleber

Alkohol-Dehydrogenasen (ADH) kommen als Ethanol (EE-ADH) und Steroid (SS-ADH) verarbeitende Isozyme zusammen mit einem Hybrid-Dimer (ES-ADH) vor. Im Enzym der Pferdeleber, das für diese Studie verwendet wurde, gibt es insgesamt 10 Unterschiede von Aminosäuren zwischen S und E Ketten, einschließlich der Deletion eines Restes in der EE-ADH (AspEE115). Die Substratspezifität von ADH ist durch die Beschaffenheit des Substratkanals gegeben, und es konnte durch Punktmutationen bewiesen werden, dass nach Deletion von AspEE115 das Enzym Aktivität an Steroiden zeigt. Nur die S-Untereinheit kann 3- $\beta$ -Hydroxysteroiden verarbeiten, welche große, voluminöse Substrate sind.

In Zusammenarbeit mit den Universitäten Lund (Schweden) und Saarbrücken wurde die Röntgenkristallstruktur von SS-ADH als Komplex mit NAD/NADH und Cholsäure gelöst. Cholsäure ist in Gegenwart von NAD ein starker Inhibitor für SS-ADH, der sich nur in der Position der 3-Hydroxyl-Gruppe von einem 3- $\beta$ -Hydroxysteroid unterscheidet. Kristallographische Daten bis zu einer Auflösung von 1.5 Å wurden bei 100 K an der Messstation BW7B bei EMBL/DESY gesammelt. Die Struktur zeigt, wie die meisten Aminosäure-Unterschiede zwischen EE- und SS-Enzymen die verschiedenen Eigenschaften beeinflussen:

- die Größe des Substratkanals,
- die Hydrophobizität der Substratbindungsregion,
- die Ladungsverteilung am Protein,
- große strukturelle Veränderungen in der steroidbindenden Schlaufe.

Dies alles trägt zur Anpassung des Substratkanals an die Bindung von Steroidsubstraten in SS-ADH bei. Der größte strukturelle Unterschied zwischen EE- und SS-ADH betrifft den Substratkanal selbst. Eine gewisse Flexibilität von hydrophoben Seitenketten lässt eine

begrenzte Gestaltveränderung des Kanals innerhalb der zentralen Kammer zu.

Phe110 und Leu116 in EE-ADH verkleinern diesen Raum, so dass er eher für kleine Substrate passt als für Steroide (Abb. 76A). AspEE115 hat den größten Einfluss auf die Weite des Kanals (Abb. 76B). Die Position von AspEE115 liegt innerhalb einer Schlaufe, zu der die Carboxylgruppe Wasserstoffbrücken über die Hauptketten-Amidstickstoffatome ausbildet. LeuEE116, das in der Nähe des Metallions im aktiven Zentrum sitzt, wird durch die verkürzte Schlaufe verdeckt. Das Cholsäure-Molekül im EE-Enzym belegt die volle Länge des Substratkanals. Das Zink-Ion im aktiven Zentrum wird von seiner Carboxylgruppe ligiert. Die erhaltenen Ergebnisse liefern eine solide strukturelle Basis für die Analyse von Unterschieden in der Substratspezifität und Stereoselektivität der ADH Isozyme.

### **Regulation der Genexpression durch anpassbare Strukturen des Transkriptionsfaktors OCT1**

Ein beträchtlicher Teil der kodierten Genprodukte der bekannten Genome reguliert deren Konvertierung von passiven Informationsträgern, den Genen, zu Proteinen, die die Maschinen der biologischen Prozesse sind. Diese Proteinfaktoren interagieren mit der DNA in den verschiedensten Formen, oft als Homo- oder Heteromultimere. Sie regulieren die Expression spezifischer Gene durch Repression und/oder Aktivierung, und tragen zur kondensierten Verpackung von Genen in zellulären Organismen bei.

In Zusammenarbeit mit einer Arbeitsgruppe des New Boulton Centers (Philadelphia) werden die Transkriptionsfaktoren der OCT-Familie untersucht. Von herausragender Bedeutung ist der Faktor OCT4, der das weitere Zellprogramm von embryonalen Stammzellen maßgeblich bestimmt. Im Berichtsjahr wurden zwei Strukturanalysen des homologen und ubiquitär vorkommenden Faktors OCT1 im Komplex mit spezifischen DNA-Elementen, die als PORE und MORE bezeichnet werden, genommen. Die Datensätze für diese Komplexe, einschließlich einem MAD-Datensatz mit Brom-substituierter DNA, wurden an den Messstationen bei EMBL/DESY gewonnen. Aufgrund der großen

Sequenzähnlichkeit von OCT1 und OCT4 lassen sich die funktionellen Implikationen der OCT1-Strukturen im Wesentlichen auf OCT4 übertragen.

Frühere biochemische Arbeiten und Modellvorhersagen konnten nur unter der Annahme erklärt werden, dass OCT-Faktoren sich, je nach DNA-Motiv, völlig unterschiedlich an die DNA anlagern. Diese Unterschiede in den resultierenden Komplexen führen zu konformationsabhängigen Regulierungen dieser OCT-Faktoren durch weitere Koaktivatoren. Im Berichtsjahr konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass OCT4 nur in der MORE-Konfiguration, nicht aber in der PORE-Konfiguration, durch den Koaktivator OCA-B reguliert werden kann.

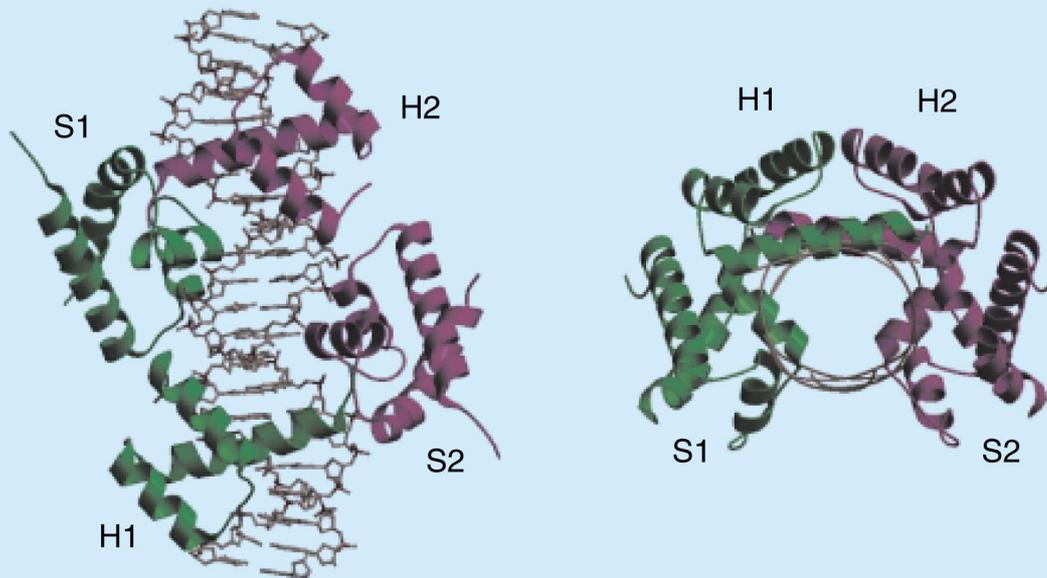
Die nunmehr gelösten Kristallstrukturen der beiden Komplexe OCT1:MORE und OCT1:PORE zeigen, dass tatsächlich der OCT1-Faktor zwei völlig unterschiedliche Komplexe in Gegenwart von unterschiedlichen DNA-Motiven bilden kann (Abb. 77). Dieses plastische strukturelle Verhalten des OCT-Faktors ist einzigartig und bis jetzt in keinem anderen vergleichbaren Faktor gefunden worden. Das erzielte Ergebnis macht deutlich, in welchem Ausmaß strukturelle Arrangements von Proteinkomplexen von deren Liganden, hier von spezifischen DNA-Motiven, induziert werden können.

Diese Arbeiten werden dazu beitragen, das plastische Strukturprogramm der weit verbreiteten Transkriptionsfaktoren besser zu verstehen.

### **Die Aktivität der Transkription und die sensorische Transduktion**

Bakterien reagieren auf ihre Umweltbedingungen mit bestimmten Veränderungen von Gen-Expressionsmustern, insbesondere auf der Ebene der Transkription. Einer der wichtigen Mechanismen, der dabei verwendet wird, basiert auf dem alternativen Faktor  $\sigma 54$ , welcher für die Initiation der Transkription in verschiedenen Prozessen verantwortlich ist, zum Beispiel dem Kohlenwasserstoff-Abbau und der Stickstoff-Fixierung. Dieser  $\sigma$ -Faktor benötigt ein so genanntes Aktivator-Protein, dessen Konzentration durch Umweltbedingungen oder intrazelluläre Faktoren kontrolliert wird. In vielen Mikroorganismen sind die Gene,

## POU:MORE



## POU:PORE

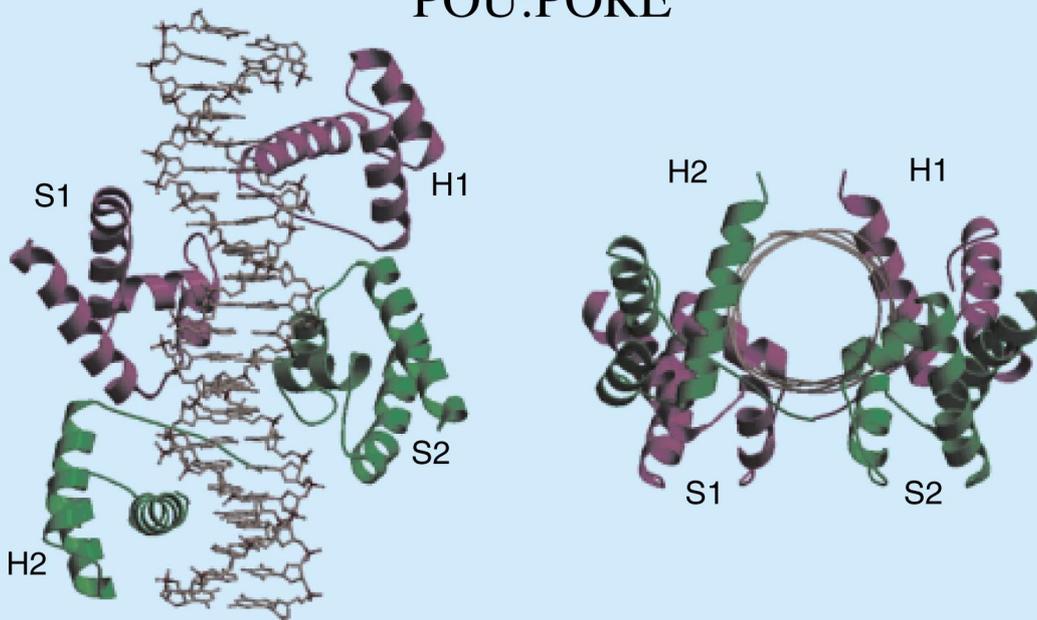


Abbildung 77: Schematische Darstellungen der beiden Protein-DNA Komplexstrukturen, OCT1:MORE und OCT1:PORE. Die Arrangements der Proteindomänen sind vollständig unterschiedlich in den beiden Komplexen.

die für die Stickstoff-Fixierung verantwortlich sind, transkriptional durch NifA aktiviert, dessen Aktivität wiederum durch NtrC kontrolliert wird. NifA sowie NtrL sind typische  $\sigma_{54}$  abhängige Aktivatoren. Jedes dieser Proteine besteht aus drei Domänen, einer DNA-bindenden Domäne, einer katalytischen (AAA) Domäne, und einer Empfänger-Domäne. NtrBC stellt ein typisches zwei-Komponenten System dar, in dem die Signal-Transduktion durch die Autophosphorylierung des Sensor-Proteins (NtrB) an ein Histidin in der Übertragungs-Domäne erfolgt. Anschließend wird die Phosphorgruppe auf die Empfänger-Domäne des regulatorischen Proteins (NtrC) übertragen. Obwohl NifL klare Ähnlichkeiten mit der Histidin Autokinase Übertragungs-Domäne zeigt, wird es nicht autophosphoryliert. Im Gegensatz dazu kontrolliert NifL wahrscheinlich die Aktivität von NifA durch eine stöchiometrische Protein:Protein Wechselwirkung. NtrB reagiert auf den Stickstoff-Status der Zelle durch eine Wechselwirkung mit dem PII Protein. NifL reagiert auf drei Effektoren: das Redox Potential der Zelle mit Hilfe einer FAD Gruppe in der sensorischen Domäne, das Stickstoff Potential und den Energiegehalt der Zelle durch ATP/ADP Bindung an der Übertragungs-Domäne. Folgende Strukturarbeiten an Proteinen dieses Systems werden zur Zeit durchgeführt:

- Die zentrale plus C-terminale Domäne eines NtrC Homologen wurde kristallisiert – die Kristalle streuen bis zu 3 Å. Produktion und Kristallisation des Selenomethionin markierten Proteins werden derzeit durchgeführt.
- Die N-terminale FAD bindende PAS/PAC (Sensor) Domäne von NifL von *Azobacter vinlandii* wurde kristallisiert. Die Kristalle streuen bis zu 3.1 Å Auflösung.
- Die Transkription des Phage-shock Protein (psp) Operons von *E. coli* steht ebenfalls unter Kontrolle des  $\sigma_{54}$ , und ist von dem Transkriptions-Faktor PspF abhängig. Das PspF Protein besteht aus 325 Aminosäuren und hat zwei Domänen, die eine Homologie zu der zentralen und der C-terminalen Domäne von NtrC zeigen. Es wurden vorläufige Kristallisationsexperimente eines PspF- $\Delta$ HtH Konstruktes, das das C-terminale „helix-turn-helix“ (HtH) Motiv nicht enthält, durchgeführt. Dabei sind nach 3–5 Wochen kleine, sehr schwach streuende Kristalle gewachsen.

- Das Phagen Schock Protein A (MW 25.5 kDa) ist ein peripheres Membran-Protein, das die Expression des psp Operons negativ reguliert. Da dem PspA ein erkennbares DNA-Bindungsmotiv fehlt, bindet es wahrscheinlich an die zentrale Domäne des PspF. Im Gegensatz zu anderen Signal-Transduktionssystemen, die zu der Zwei-Komponenten Familie gehören, spielt hier die Phosphorylierung an der Regulation des psp Operons keine Rolle. Die His-tag Version des PspA Proteins wurde hergestellt, das Protein überexprimiert und die Reinigungsschritte optimiert. Es wurden Mikrokristalle erhalten und es wird jetzt versucht, diese durch Anwendung bestimmter Konditionen zu verbessern.
- Da Proteine von thermophilen Organismen oft leichter kristallisieren als die von mesophilen, konzentrierte sich eine Untersuchung auf das NifA-analoge Protein des hyperthermophilen *Aquifex aeolicus*. Das Protein wurde überexprimiert und gereinigt. Nach Optimierung der Reinigungsprotokolle wurden verschiedene Kristallisationsbedingungen getestet, um Proteinkristalle zu bekommen. Nach einer Inkubation von 3–4 Wochen wurden einige kleine, sehr fragile Kristalle erhalten, die gegenwärtig verbessert werden.

## Nichtkristalline Systeme

Die Arbeit der Gruppe konzentrierte sich auf zwei Hauptthemen: die Entwicklung eines Datenerfassungssystems auf der Grundlage der Zeit-Raum-Zeit Umwandlung und die Entwicklung von Dateninterpretationsmethoden.

Die Zeit-Raum-Zeit Umwandlung ist eine Methode zur Auslese von Gasdetektoren mit Verzögerungsleitungen, die die Nachteile der üblichen Analog/Digital oder Zeit/Digital Umwandlungsmethoden, wie niedrige Zählraten und Schwierigkeiten bei der Auslese zeitgleicher Ereignisse, umgeht. Als Folge der Ionisation des Gases im Detektor entsteht gleichzeitig auf der Anode ein elektrischer Puls, und kurz danach wird von der Ionenwolke ein Signal auf der Kathode induziert, die mit einer LC-Verzögerungsleitung mit Transitzeit T gekoppelt ist. Dieses Signal teilt sich in zwei identische

Pulse, die sich in Gegenrichtung auf der Verzögerungsleitung fortpflanzen. Üblicherweise wird die Zeitdifferenz zwischen der Ankunft der Pulse auf beiden Seiten der Verzögerungsleitung gemessen, um die Position des Ereignisses zu bestimmen.

Anders ist es in der Zeit-Raum-Zeit Methode. In diesem Fall werden die zwei Pulse auf einer zweiten Verzögerungsleitung mit identischen Eigenschaften rekombiniert. Diese zweite Leitung, die in einem speziell entwickelten ASIC („Application Specific Integrated Circuit“) eingebaut ist, besteht aus einer Kette von Invertoren, die mit Komparatoren und Zählern verbunden sind, wobei die 64 Elemente in jedem ASIC eine 20 ns lange Pseudo-Verzögerungsleitung bilden. In ihrem Prinzip ist die Methode analog zur Zeitsynchronisation in Einsteins Gedankenexperimenten oder zur Zwei-Weg Übertragungsmethode in der Zeitmetrologie. Im Rahmen des von der Europäischen Union finanzierten PASERO-Projekts wurde von der Firma Smart Silicon Systems (Lausanne) ein NIM-Modul mit 16 ASICs entwickelt. Dieses Modul, das ein universales Auslesesystem für lineare Detektoren bietet, wurde, in Zusammenarbeit mit EMBL-Grenoble und dem ESRF, mit einer Reihe verschiedener Detektortypen erfolgreich getestet. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden auf der SRI-2000 Konferenz in Berlin vorgetragen.

Im Rahmen der Entwicklung neuer Dateninterpretationsmethoden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kristallographie in Moskau wurde eine neue Version des CRY SOL-Programms (CRYDAM) geschrieben. Diese neue Version erlaubt es jetzt, neben Lösungsstreukskurven von Proteinen auch die von Nukleinsäuren und Sacchariden und ihren Komplexen anhand der Koordinaten in der Protein Datenbank unter Berücksichtigung der Hydratisierungsschale zu berechnen.

Weiter wurde ein Algorithmus entwickelt und in einem Programm (SUPCOMB) implementiert, um verschiedene Modelle, zum Beispiel aus hochaufgelösten Kristallstrukturen, Elektronenmikroskopie oder Kernresonanz, räumlich optimal aufeinander auszurichten.

Das DAMMIN-Programm wurde auch weiterentwickelt und angewandt, um Modelle von Proteinen und Nukleinsäuren, zum Beispiel 5S RNS, ab initio aus Lösungsstreukskurven zu berechnen.

Das neue Programm MASSHA für PC bietet eine Erweiterung des ASSA Systems, das auf UNIX-Rechnern läuft, um Modelle aus verschiedenen Quellen dreidimensional darzustellen, zu manipulieren und zu vergleichen. Es ist sehr bedienungsfreundlich und soll Biochemikern erleichtern, gezieltere Experimente zu planen und die Größe der Effekte abzuschätzen, die in Lösungsstreuungsexperimenten bei konformationellen Änderungen oder Komplexbildung zu erwarten sind.

## EXAFS an biologischen Systemen

Die Röntgenabsorptionsspektroskopie ermöglicht die Bestimmung der Metallkoordination in Metalloproteinen. Die Methode ist sensitiv auf Änderungen in der ersten Koordinationssphäre durch Bindung von Substraten oder Inhibitoren. Des Weiteren erlaubt sie die Ermittlung des Oxidationszustands des Metallatoms.

Für die Anwendungen auf biologische Systeme betreibt EMBL Hamburg einen eigenen Messplatz. Ein Schwerpunkt der Arbeit lag in der Optimierung dieses Spektrometers. Alle Verbesserungen zielen auf die Erhöhung der Strahlungsintensität und -stabilität auf der Probe, bzw. die Automatisierung und Vereinfachung des Nutzerinterfaces. Dazu wurde ein neues Si(311) Kristallpaar eingesetzt, wobei der thermische Kontakt zwischen dem ersten Kristall und dem Kühlblock durch eine dünne Lage GaIn-Eutektikum optimiert wurde. Dies führt zu einer sehr guten Energiestabilität des Spektrometers, die jetzt hauptsächlich durch Strahlschwankungen des DORIS-Speicherrings beschränkt wird.

Des Weiteren konnte den Nutzern ein neuer Regelkreis für die Stabilisierung des Monochromator-Detunings zur Verfügung gestellt werden. Dieser verringert die Intensitätsschwankungen auf der Probe deutlich. Diese Verbesserungen resultierten in einer Erhöhung der Strahlungsintensität auf der Probe von bis zu 70%. Die Verbindung dieser Steuerung mit der Datennahme entlastet die Gäste stark. Somit können sie sich verstärkt den wissenschaftlichen Fragestellungen zuwenden.

Im Jahr 2000 wurde eine Vielzahl an Projekten durchgeführt, viele in Kooperation mit anderen Labors aus ganz Europa. Dieser Bericht skizziert ein Projekt in Zusammenarbeit mit den Universitäten Bayreuth und Lübeck.

Das Metalloenzym CO-Dehydrogenase aus *Oligotropha carboxidovorans* ist ein Molybdän-haltiges Eisen-Schwefel-Flavoprotein, welches die Oxidation von CO zu CO<sub>2</sub> katalysiert. Es ist das Schlüsselenzym in der anäroben Nutzung von CO durch Bakterien in CO-Atmosphären. Um den katalytischen Mechanismus zu verstehen, wurden mit der Röntgenabsorptionsspektroskopie mehrere Zustände des Enzyms jeweils als gefrorene Lösung analysiert. Aus diesen Messungen resultiert eine radiale Abstandsverteilung der Nachbaratome des Mo-Zentralatoms. Dies erlaubt es, die Struktur des aktiven Zentrums zu verfeinern. Um die Funktionsweise des Enzyms zu verstehen, ist es sehr hilfreich, mehrere Zwischenzustände im katalytischen Zyklus zu modellieren. Hieraus ergibt sich am Ende ein Gesamtbild der Funktionsweise.

Skizziert man die Resultate im vorliegenden Fall, so fällt auf, dass das Mo-Atom stets an mindestens zwei Schwefelatome gebunden ist. Oxidierter und reduzierter Zustand unterscheiden sich insbesondere in der Anzahl an Sauerstoffliganden bei kurzen Abständen. Fol-

gerichtig ist dies einer der Schlüssel zum Verständnis der Prozesse.

Die Messungen zeigten jedoch noch eine andere wichtige Tatsache. Aus der Position der Absorptionskante wird der Oxidationszustand des Mo-Atoms bestimmt. Eine zu geringe Differenz wurde zwischen oxidiertem und reduziertem Zustand ermittelt. Hieraus folgt, dass nicht alle Mo-Zentren in die katalytische Aktivität eingebunden sind. Aufgrund dieser Informationen war es möglich, gezielt nach molekularbiologischen Bedingungen zu suchen, die eine Erhöhung der Aktivität erlauben.

Letztendlich gelang es, die Aktivität zu verfünffachen. Aus einem Vergleich der Proben konnten die für die Aktivität essentiellen Komponenten des Metallclusters bestimmt werden. Neben einem weiteren vermutlich cyanolisierbaren Schwefelliganden, welcher in der inaktiven Spezies durch Sauerstoff substituiert ist, handelt es sich um ein Atom im Abstand von 3.7 Å, das vermutlich als 3d Metall identifiziert wurde.

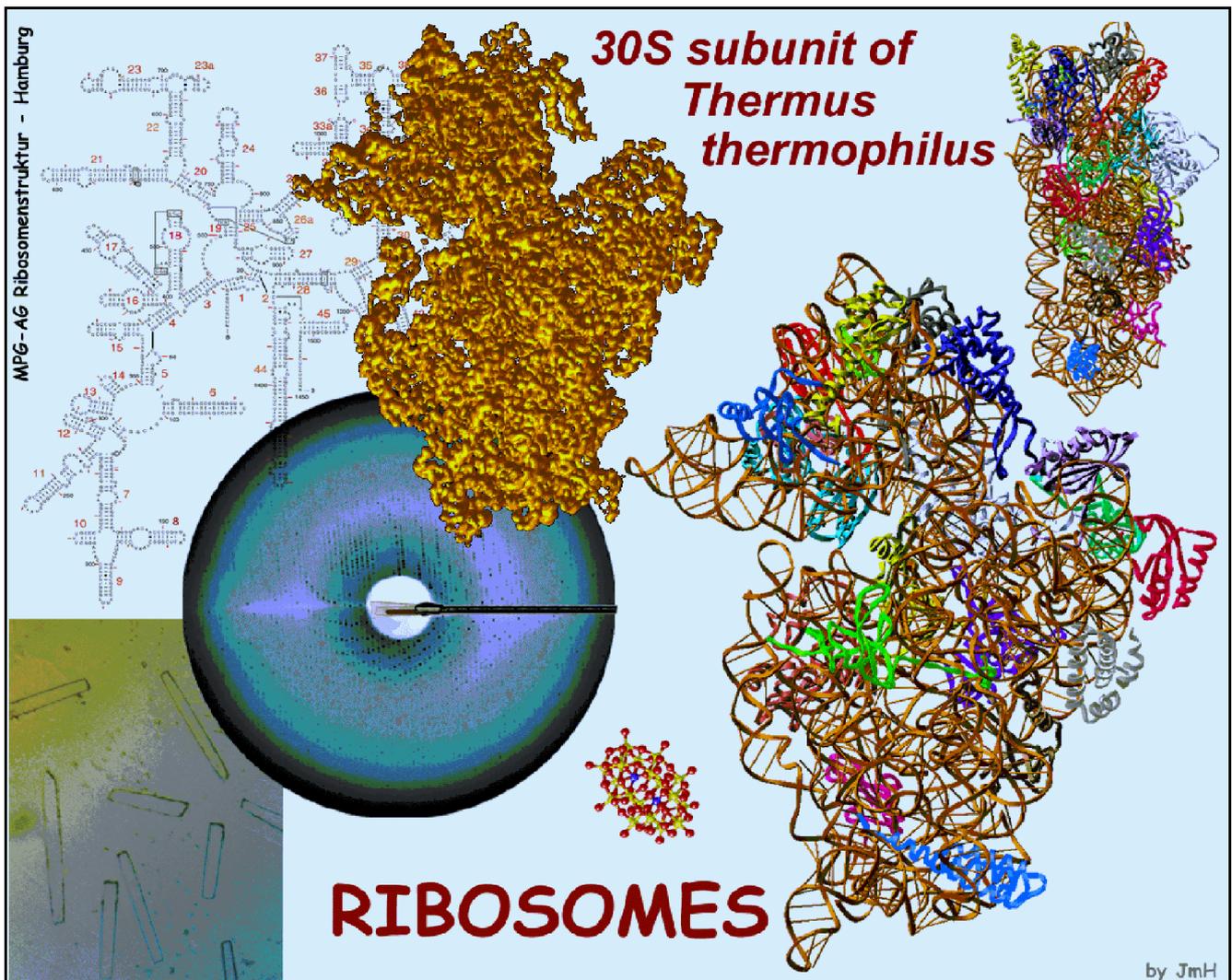


Abbildung 78: Collage von J.M. Harms „Die 30S ribosomale Untereinheit von *Thermus thermophilus*: Von den Kristallen zur Struktur.“ Die 2-dimensionale Struktur der 16S RNA wurde aus Gutell et al. 2000 entnommen.

# 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 ultrahoher Auflösung, der Kryokristallographie sowie der Nanosekunden-zeit aufgelösten 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 zur Lösung neuer Proteinstrukturen. Die Nutzung der anomalen Streuung in Verbindung mit Kryotechniken ermöglicht es in der Regel, eine Proteinstruktur mit unbekannter Faltung innerhalb von ein oder zwei Tagen so weit aufzuklären, dass die Elektronendichteverteilung modelliert und verfeinert werden kann – oft auf der Grundlage von Beugungsmessungen an einem einzigen Kristall. Wenn Beugungsdaten bis zu hoher Auflösung verfügbar sind, sind anomale Phasen von so hoher Genauigkeit, dass die experimentelle Elektronendichteverteilung in vielen Fällen weitgehend automatisch interpretiert werden kann.

Ein Beispiel dafür ist die Aufklärung der Kristallstruktur der 6-Hydroxy-L-Nikotin-Oxidase (Abb. 79) in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg. Dieses stereospezifische Enzym, ein dimeres Flavoprotein mit einem Molekulargewicht von 93 000, ermöglicht es dem Bakterium *Arthrobacter nicotinovorans*, seinen gesamten Bedarf an Kohlenstoff und Stickstoff aus der Umwandlung von Nikotin zu erzeugen. Die Homologie zu wesentlichen Teilen der menschlichen Monoaminoxidase (MAO), deren Hemmung ein Bestandteil der medikamentösen Behandlung von Parkinsonpatienten darstellt, erhöht das Interesse an dieser Struktur zusätzlich.

Techniken rascher Derivatisierung beeinflussen den Zeitaufwand für Proteinstrukturaufklärung erheblich. Die Strukturanalyse der 6HLNO veranschaulicht die Möglichkeit, unmittelbar vor Beginn der Röntgenmessungen geeignete Derivate herzustellen, in diesem Fall durch Eindiffusion von Xenon unter hohem Druck von etwa 20 bar bzw. von Halogeniden. Generell ist der Zugang zu geeigneten Röntgenabsorptionskanten einer möglichst großen Zahl von Elementen von erheblicher praktischer Bedeutung für eine schnelle Lösung von Proteinstrukturen mit anomalen Verfahren. Wir er-

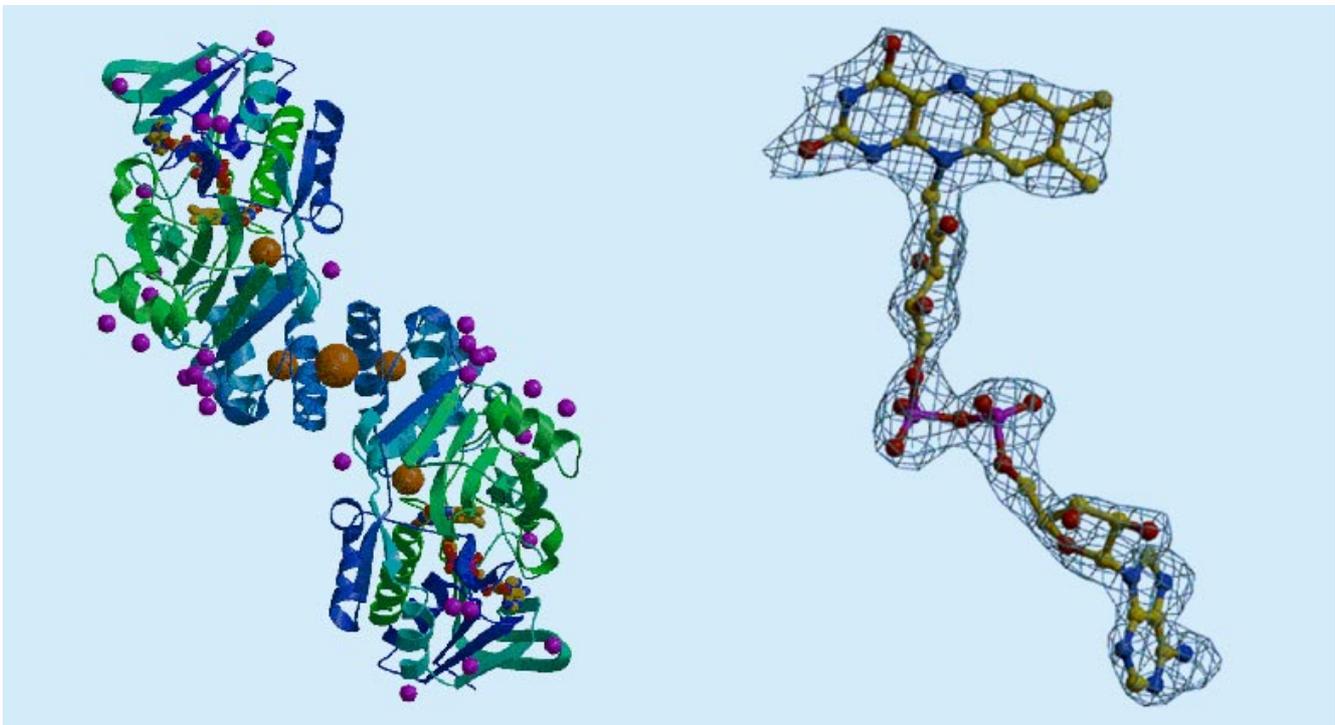


Abbildung 79: Kristallstruktur der 6-Hydroxy-L-Nikotin-Oxidase von *A. nicotinovorans* bei 1.95 Å Auflösung (Kachalova et al., 2000). Die Elektronendichteverteilung im Bereich des FAD (links) zeigt die hohe Qualität der experimentellen Phasen. Das verfeinerte Strukturmodell (rechts) zeigt das dimere Enzym mit den Lagen der Xenon-Atome und Bromid-Ionen. Diese Derivate wurden unmittelbar vor den Röntgenmessungen am BW6 hergestellt.

weiterten den Anwendungsbereich bis in den Bereich weicher Röntgenstrahlung und lösten die mit der zunehmenden Absorption verbundenen Skalierungsprobleme.

Es gelang erstmals, anomale Phasen sogar bei Röntgenwellenlängen bis zu etwa 3.1 Å zu bestimmen (Abb. 80). Damit können eine Reihe von Absorptionskanten wie Xe-L3, I-L3 und Ca-K genutzt werden. Darüber hinaus sind bei den langen Wellenlängen die anomalen Streubeiträge von Schwefelatomen im Proteinmolekül so stark, dass sie zur Phasenlösung genutzt werden können. Diese Entwicklungen machen die Suche nach Derivaten, die früher oft den langwierigsten Teil der Kristallstrukturanalyse von Proteinen ausmachte, in der Regel unnötig. Die vergleichsweise geringen systematischen Fehler bei der Phasierung mit anomalen Verfahren machen es darüber hinaus oft möglich, auf Messungen bei multiplen Wellenlängen (MAD-Methoden) zu verzichten, und stattdessen anomale Messungen bei einer

einzigsten Wellenlänge (SAD) in Verbindung mit Verfahren der Dichtemodifikation zur Strukturlösung einzusetzen. Dies führt zu einer weiteren Beschleunigung. Die neuen Techniken werden in Zukunft insbesondere auch für Anwendungen in der Strukturgenomik von Bedeutung sein.

Mit SAD- und MAD-Verfahren konnte im vergangenen Jahr eine Reihe wichtiger Strukturen gelöst werden. Ein Beispiel dafür ist die Struktur von Komplexen, die wesentliche Bestandteile bei der Bildung eines Multichaperons darstellen. Ein weiteres Beispiel ist eine bakterielle Cytochrome-c-Oxidase. Diese Arbeit stellt gleichzeitig die erste erfolgreiche Anwendung von MAD-Verfahren auf die Lösung der Kristallstruktur eines integralen Membranproteins dar.

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

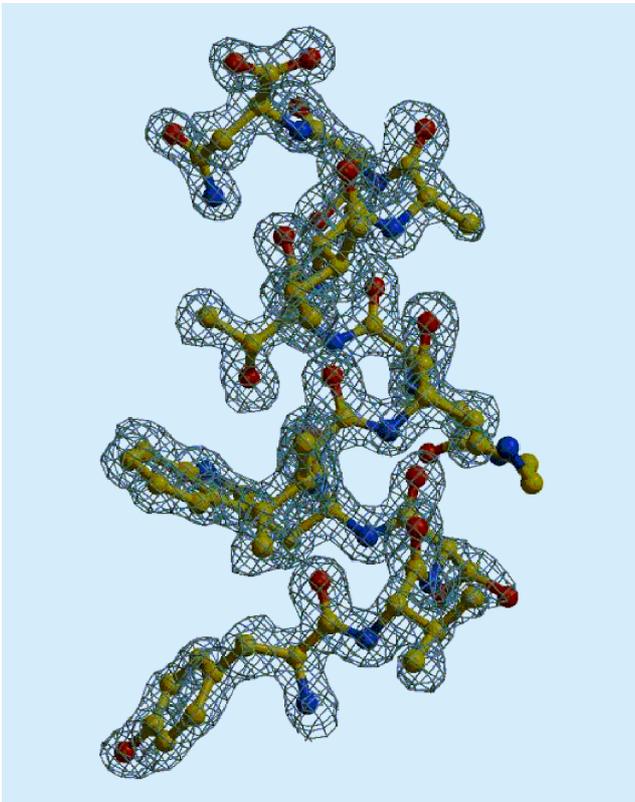


Abbildung 80: Erste Anwendung anomaler Phasierung im Bereich weicher Röntgenstrahlung auf orthorhombisches  $\beta$ -Trypsin von Rinderpankreas. MAD-Daten wurden an der K-Absorptionskante von Calcium ( $3.07 \text{ \AA}$ ) gemessen. Die anomalen Beiträge von Schwefelatomen im Proteinmolekül wurden mit einbezogen. Die Elektronendichtekarte zeigt die hohe Qualität der experimentellen Phasen vor Beginn der Verfeinerung.

## Zytoskelett

Die MPG-Gruppe „Zytoskelett“ befasst sich mit der Strukturbestimmung von Proteinen des Zytoskeletts mit Hilfe der Synchrotronstrahlung sowie der Untersuchung des Struktur-Funktions-Zusammenhangs von Tubulin, Mikrotubuli-assoziierten Proteinen und Motorproteinen aus Nervenzellen. 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.

Kinesin und andere Proteine aus der Familie der Kinesine sind molekulare Motoren, die Energie aus der Hydrolyse von ATP zu ADP gewinnen und diese für die gerichtete Bewegung entlang der Mikrotubuli verwenden. Das „konventionelle“ Kinesin 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 ATP-Hydrolyse und die Interaktion mit den Mikrotubuli verantwortlich. Kinesine sind hauptsächlich für den Transport vom Minus- zum Plus-Ende der Mikrotubuli zuständig („Plus-Motoren“). Dies gilt auch für das konventionelle Kinesin.

Mittlerweile sind Röntgenstrukturen von Motordomänen verschiedener Kinesine bekannt, unter anderem aus konventionellem Kinesin von Mensch und Ratte, aber auch von verwandten Motorproteinen mit umgekehrter Bewegungsrichtung (Ncd, Kar3; „Minus-Motoren“). Trotzdem ist der vollständige Mechanismus der ATP-Hydrolyse noch nicht geklärt, denn alle zur Zeit in der Proteindatenbank gesammelten Kinesin-Strukturen zeigen die Motordomäne im selben Zustand, nämlich als Komplex mit ADP. Vor kurzem ist es gelungen, die Motordomäne des Pilzkinesins NcKin (*Neurospora crassa* kinesin) – ebenfalls im Komplex mit ADP – zu kristallisieren und die Struktur mit Röntgendiffraktion zu bestimmen. NcKin hat keine leichten Ketten und bewegt sich drei- bis fünfmal schneller als das konventionelle Kinesin aus tierischen Zellen. Durch den Vergleich der Struktur des Pilzkinesins mit den bereits bekannten Kinesinstrukturen ergeben sich Hinweise auf den Mechanismus der Motoraktivität. In einem komplementären Ansatz wurde die Struktur einer „Schalterdomäne“ des Kinesins, die die Verbindung zwischen der katalytischen Kopfdomäne und der Schwanzdomäne darstellt, mit NMR-Methoden gelöst, da in diesem Fall eine flexible Struktur vorliegt, die sich nicht zur Kristallisation eignet. Die Ergebnisse zeigen, dass Röntgen- und NMR-Methoden gleichwertige Strukturen liefern für den überlappenden Teil der beiden Proteine, dass aber die NMR-Methode imstande ist, Röntgenergebnisse in den ungeordneten Teil eines Proteins auszuweiten.

In einem weiteren Projekt geht es um die Frage, wie „ungeordnete“ Proteine miteinander und mit anderen Komponenten der lebenden Zelle strukturell wechselwirken. Die Abwesenheit von einer definier-

ten globulären Struktur führt häufig dazu, dass die Proteine miteinander „falsch“ reagieren, zu großen Polymerkomplexen (Fasern) aggregieren und damit die Zelle schädigen. Dieser Prozess ist die Grundlage verschiedener Demenzen des Menschen (Beispiel: Alzheimer-Krankheit, Parkinson-Krankheit, Creutzfeld-Jacob-Krankheit) und von Tieren (Beispiel: BSE = Rinderwahn). Das hier untersuchte Tau-Protein aggregiert zu Neurofibrillenbündeln in der Alzheimer-Krankheit, und Mutationen des Tau-Proteins lösen sogenannte „frontotemporale“ Demenzen aus (FTDP-17). Der Aggregationsprozess wurde *in vitro* nachvollzogen, so dass es möglich wurde, die Natur der pathologischen Fibrillenbildung zu untersuchen. Es zeigte sich, dass bestimmte Tau-Mutanten der frontotemporalen Demenz besonders stark zur Fibrillenbildung neigen, verglichen mit der langsameren Aggregation des Tau-Proteins, die der Alzheimer-Krankheit zugrunde liegt. In beiden Fällen liegt aber ein ähnliches Strukturprinzip zugrunde: Eine kurze Sequenz des Proteins (ein Hexapeptid-Motiv) induziert beta-Strang-ähnliche Wechselwirkungen, die sich autonom amplifizieren und somit Fasern bilden. Diese Erkenntnisse können im Prinzip dazu benutzt werden, Hemmstoffe für die Aggregation zu suchen, mit denen der Krankheitsprozess aufgehalten werden könnte.

## Struktur der Ribosomen

Bei der Proteinbiosynthese wird genetische Information (mRNA) gelesen und in Anweisungen für den schrittweisen Aufbau von Eiweißmolekülen übersetzt. Der gesamte Prozess wird durch das Ribosom, einen Molekülkomplex aus verschiedenen Proteinen und drei RNA-Ketten, ausgeführt. Die Proteinbiosynthese beginnt, wenn sich die beiden aktiven, verschieden großen Untereinheiten (30S und 50S in Prokaryonten) an der mRNA zu dem gesamten Ribosom zusammenschließen. Die Prinzipien der Proteinbiosynthese sind bereits auf biochemischem Wege erklärbar. Die Synthese beginnt damit, dass sich die kleine 30S-Untereinheit zusammen mit Initiationsfaktoren an die mRNA heftet.

Die 30S-Untereinheit stellt die Andockstellen für verschiedene tRNAs bereit; sie ist im Vergleich zur eher stabilen 50S-Untereinheit dynamisch und flexibel, was sie wissenschaftlich besonders interessant erscheinen lässt.

Das Verständnis des detaillierten Prozesses auf molekularer Basis erfordert jedoch die Kenntnis der dreidimensionalen Struktur. Diese konnte für die 30S-Untereinheit von *Thermus thermophilus* bei 3.3 Å im vergangenen Jahr erstmals von der Arbeitsgruppe vorgestellt werden. Die kleine ribosomale Untereinheit besteht aus 20 Proteinen und einer 16S RNA-Kette bzw. mehr als 50 000 Nichtwasserstoff-Atomen mit einem Molekulargewicht von 0.85 Millionen Dalton. 98% der aus 1518 Nukleotiden bestehenden RNA-Kette und alle 20 Proteine konnten identifiziert oder modelliert werden.

Die Struktur der kleinen ribosomalen Untereinheit von *Thermus thermophilus* weist bekannte wie auch neu entdeckte Falt- und Packungsmotive auf. Es gelang außerdem die funktionale Zuordnung für den Weg der mRNA und die Bindestellen der tRNA. Schließlich konnte aufgrund des erstellten Modells ein Konzept für die Dynamik der Translokation vorgeschlagen werden.

Die ribosomalen Kristalle enthalten einen Lösungsanteil von 65% und sind von einem Netzwerk von Kanälen durchsetzt, was das Eindringen und die spezifische Bindung an bestimmte Molekülstellen erheblich vereinfacht. So gelang es bereits, den Initiationsfaktor IF3 mit der 30S-Untereinheit zu co-kristallisieren, um weitere Einblicke in den Beginn der Proteinbiosynthese zu erhalten. Viele Antibiotika hemmen die Eiweiß-Synthese, indem sie zum Beispiel Andockstellen für tRNA an der ribosomalen Untereinheit blockieren. Durch Co-Kristallisation oder Diffusion entstandene 30S-Antibiotika-Komplexe werden kristallographisch untersucht, wobei zunächst die Bindungsstellen an der Untereinheit lokalisiert werden. Aus den induzierten Konformationsänderungen der dreidimensionalen Struktur kann, im Vergleich mit biochemischen Daten, die molekulare Wirkungsweise der Antibiotika erklärt werden (Abb. 78).

# Elektronik-Entwicklung

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

## Projekte

### ZEUS Luminositäts-Monitor

Das ZEUS-Experiment misst die Luminosität der  $e p$ -Kollisionen mit der Abstrahlung eines Photons unter sehr kleinem Winkel. Diese Photonen werden mit einem Kalorimeter nachgewiesen, das mit Photovervielfachern ausgelesen wird. Das Integral der Pulse ist proportional zur Energie der Photonen. Durch die Luminositätserhöhung von HERA wird in vielen Bunchcrossings erhebliche Energie (größer 10% der maximal möglichen) im Kalorimeter deponiert. Da sich alle 96 ns die Elektronen- und Protonenpakete kreuzen, muss innerhalb dieser Zeit ein möglichst langes Intervall integriert, das Integral digitalisiert und alles wieder möglichst gut auf den Anfangszustand zurückgesetzt werden.

Mit dem Simulator für analoge Schaltungen (MENTOR-GRAPHICS, ACCUSIM) wurde von der Gruppe FEB eine Schaltung entwickelt, die eine Integrationszeit von 60 ns zulässt und gleichzeitig für die nächste Strahlkreuzung den Anfangszustand wieder besser als 1% des Integrals erreicht. Das Signal wird mit 12 bit Auflösung digitalisiert. Als digitale Kontrollsignale braucht die Schaltung ein Taktsignal zur Konvertierung des Pulses und einen Puls, der das Zeitfenster der Entladung steuert. Das Intervall für das Integral ergibt sich aus dem Ende des Entladens und dem Zeitpunkt der Konversion. Teile der Schaltung wurden handverdrahtet getestet. Derzeit ist der Prototyp in Produktion.

Die Auslese und Weiterverarbeitung der digitalisierten Daten geschieht in einer gemeinsamen VME-basierten Entwicklung von FEA und ZEUS-Mitarbeitern. Dazu wird ein VME-Crate mit 14 Memory Boards und einem Trigger Board sowie einem kommerziellen CPU Board bestückt. Jedes Memory Board sammelt die Daten von 16 Kanälen (seriell über die Frontplatte zugeführt), verarbeitet diese Daten (alle 96 ns) nach einem vorgegebenen Algorithmus (zum Beispiel Summe) und sendet diese Information an das Trigger Board (über eine speziell angefertigte Backplane). Auf dem Trigger Board wird entschieden, ob die Daten eingelesen oder verworfen werden sollen. Für die Dauer dieses Entscheidungsvorgangs werden die Daten in digitalen Pipelines auf den Memory Boards gehalten. Die akzeptierten Daten werden in Dual-Port Memories gespeichert und dann über den VME Bus ausgelesen. Von der Gruppe FEA wurden Memory-Module (20 VME-Module), Pipelines und Speicher (80 Mezzanine Boards), Backplane (Kommunikation zwischen Memory und Trigger Boards) sowie Testadapter für die Mezzanine Boards entwickelt und gefertigt. Die Entwicklung der Prototypen wurde abgeschlossen; die ersten Tests werden im Februar 2001 durchgeführt.

### Detektoren für den Strahlenschutz

Beim Betrieb des Photoinjektors in Zeuthen (PITZ) wird die Dosisleistung in der Umgebung des Beschleunigers mit Ionisationskammern und neutronenempfindlichen Proportionalzählrohren ständig überwacht und protokolliert. Eine erhöhte Strahlenbelastung führt bei der Überschreitung von vorgegebenen Grenzwerten automatisch zur Unterbrechung des Betriebes. Die Gruppe FEB hat die Ausleseelektronik für die Detektoren entwickelt und die Gruppe FEE hat die Software für den Betrieb der Anlage und die Datenerfassung erstellt.

Für die Ionisationskammern war bereits 1999 ein hochsensitiver Verstärker (bis 1 pA) fertiggestellt worden. Im Berichtszeitraum wurde ein weiterer Analogverstärker für den Nachweis von Neutronen über Pulse eines Borfluorid-Proportionalzählrohres entwickelt. Ein Schwellendiskriminator sorgt für Unterdrückung von Photonen. Beide Verstärkertypen werden über einen gemeinsamen Digitalteil ausgelesen, der zwei Hauptfunktionen erfüllt. Er zählt zum einen die Anzahl der Impulse als Maß für die Strahlendosis und vergleicht ständig den zeitlichen Abstand zweier aufeinanderfolgender Pulse mit einem Schwellenwert, um bei Unterschreitung einer Schwelle ein Alarmsignal auszulösen. Zum anderen kommuniziert er über einen Feldbus (CAN) mit dem übergeordneten Kontrollrechner.

Die Software gliedert sich in drei Hauptkomponenten für Konfiguration und Betrieb, Datenspeicherung sowie Visualisierung. Die erste Komponente wurde als eigenständige C++ Applikation unter LINUX auf einem Industrie-PC entwickelt. Separate Prozesse wickeln die Kommunikation mit den Schnittstellen zur SQL-Datenbank, dem Feldbus und der Benutzeroberfläche ab, die als eigenständiges JAVA-Programm implementiert ist. Dieser Ansatz ermöglicht es, die graphische Benutzeroberfläche auch außerhalb von Zeuthen zu betreiben und vereinfacht so wesentlich die Wartung der Programme. Selbstverständlich ist durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen ein unbefugter Zugriff von außen unterbunden. Die Datenspeicherung erfolgt in eine kommerzielle SQL-Datenbank, so dass die Datenanalyse mit Standard-Werkzeugen leicht möglich ist.

Das System ist bereits von der Strahlenschutzgruppe getestet und vor Ort in Zeuthen installiert.

### Transientenrekorder

Bei HERA und TTF stellt sich oft die Aufgabe, die Ursache für Fehlerzustände eindeutig zu erkennen. Dazu dient die Erfassung schneller analoger und digitaler Vorgänge mittels eines Transientenrekordersystems, das von den Gruppen FEB und FEA entwickelt wurde. Das Besondere an diesem System ist die synchrone Datenerfassung am ganzen Beschleuniger und ein Archiv, das zu einem Ereignis alle Messungen enthält, die an weit verstreuten Messorten erfasst wurden. Die Signalkonversion wird direkt vor Ort von Tastköpfen

durchgeführt, die eine Auflösung von 12 Bit und eine einstellbare Taktrate von maximal 100 kHz aufweisen. Die erfassten Daten werden in einen 8 k tiefen Speicher geschrieben. Parallel dazu werden diese in Echtzeit auf Besonderheiten analysiert und damit gegebenenfalls eine Archivierung aller Messungen ausgelöst.

Bei HERA sind die Komponenten Quenchprotection, Energieversorgung und Proton-HF mit derartigen Geräten ausgerüstet. Die Anbindung an das Kontroll- und Archivsystem von HERA wird ständig weiterentwickelt. Die Klystrons des HERA-Elektronenrings benötigen schnellere Datenerfassung (1 MHz), 10 Bit Auflösung und eine Spannungsfestigkeit von 30 kV, die zwischen Tastkopf und Steuereinheit als Transienten auftreten können.

Im Prototyp wurde ein DC-DC Wandler mit 30 kV Isolation fertiggestellt, mit dem die Energieversorgung eines Tastkopfes erfolgen kann. Der Strom wird als 10 MHz-Wechselspannung durch 1 nF Kondensatoren übertragen. Die Signalübertragung zwischen Steuerung und Tastkopf über die 30 kV-Barriere wird mit optischen 20 Mbaud-Fasern realisiert, auf denen die Daten seriell, aber asynchron verzögert, zu einem 1 MHz-Taktsignal übertragen werden.

Die erforderliche Elektronik wurde im Hinblick auf den Stromverbrauch der isolierten Seite optimiert. Es wurde ein Prototyp erstellt, der diesen Datenstrom wieder zum Taktsignal synchronisiert und die Weiterverarbeitung mit Komponenten der Standard Transientenrekorder erlaubt.

### Temperaturüberwachung für HERA

Nach der Luminositätserhöhung müssen die Temperaturen einiger Komponenten des HERA-Beschleunigers ständig überwacht werden, um bei Übertemperaturen den Elektronenstrahl abzuschalten und so die Experimentieranlagen zu schützen.

Die Gruppe FEB entwickelt ein Elektroniksystem, bei dem Strahlenresistenz, ein erweiterter Temperaturbereich, Wartbarkeit, sichere Datenübertragung über lange Strecken und Ausfallsicherheit von großer Bedeutung sind. Wegen des geringen Rauschabstandes, der geforderten Genauigkeit und des Strahlungspegels

wird die Temperatur nahe an den vom Kunden vorgegebenen Pt100-Sensoren in eine Frequenz umgewandelt. Dieses digitale Signal wird über lange Kabel in die HERA-Experimentierhallen übertragen und über volle Perioden der 230 V-Netzfrequenz ausgezählt. So wird Rauschen aufgrund von Einstreuung aus dem Stromnetz vermieden. Es stehen 10 Messwerte pro Sekunde zur Verfügung. Vergleiche mit Schwellen lösen Alarm aus, der zum Dump der Elektronen führt. Zusätzliche Eingänge erlauben es externen Quellen des HERA-Beschleunigers und der Experimente, den Strahl zu stoppen. Ein lokaler Rechner sammelt und speichert die Messwerte, übermittelt die Daten über Intranet an das HERA-Archivsystem und versorgt außerdem das Betriebspersonal mit Informationen über den Betriebszustand der einzelnen Elektronikkomponenten. Eine Fernbedienung des Systems ist ebenfalls möglich, allerdings beschränkt auf Aktionen, die eine Betriebssicherheit nicht beeinträchtigen.

Vom Digitalisierer stand bereits zu Jahresbeginn ein Prototyp zur Verfügung, der zur Serienreife weiterentwickelt und in größerer Stückzahl gefertigt wurde. Die übrigen Elektronikkomponenten sind alle als Prototyp vorhanden und einzeln getestet. Nach den derzeitigen Tests, bei denen das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem im Vordergrund steht, ist eine Freigabe für die Serienfertigung Anfang 2001 zu erwarten.

Parallel dazu betreibt die Gruppe FEB in enger Zusammenarbeit mit MPY die Vorbereitung des Einbaus des Temperaturüberwachungs- und Alarmsystems in den HERA-Beschleuniger.

## Silizium-Driftdetektorsystem

Die Gruppe FEC ist seit Mitte 1998 an der Entwicklung eines Silizium-Driftdetektorsystems für röntgenographische Experimente. Wie dem Vorjahresbericht zu entnehmen ist, besteht die Auswerteelektronik aus einem A/D-Wandlermodul, einem optischen Übertragungs- und Steuersystem sowie einem Multikanalanalysator (MCA), wobei die letztgenannten Module bereits 1999 fertiggestellt wurden. Im Berichtszeitraum konzentrierten sich die FEC-Entwicklungsarbeiten unter anderem auf die Fertigstellung des A/D-Wandlermoduls, dessen Aufbau im Folgenden

beschrieben wird. Abbildung 81 zeigt die Fotografie des A/D-Wandler-Moduls, bestehend aus einer Mutterkarte im Europakartenformat  $10 \times 16 \text{ cm}^2$  und 20 Multi-Chip-Modulen (MCMs) der Größe  $26 \times 12 \text{ mm}^2$ .

In der linken, unteren Ecke der Abbildung ist die Mutterkarte beidseitig mit 80-poligen SMD-Steckverbindern bestückt, die die elektrische Schnittstelle zu zwei vorgeschalteten Detektormodulen bilden. Eine differentielle Signalführung in den Innenlagen der Mutterkarte stellt eine parasitätsarme, elektrische Anbindung an die aufgesteckten MCMs sicher. Jedes dieser Module bereitet den einfließenden Analogdatenstrom zunächst auf und tastet diesen anschließend mit einer Wiederholrate von bis zu 6 MS/s synchron ab. Ein monolithischer A/D-Wandler auf dem MCM digitalisiert die Abtastwerte mit einer nominellen Auflösung von 12 Bit. Ein weiteres Bit signalisiert eine Über- bzw. Unterschreitung des erlaubten Dynamikbereiches und wird zusammen mit den digitalisierten Analogwerten in einem Schieberegister zu einem seriellen Datenstrom von 78 Mbit/s verarbeitet.

An einer bipolaren Spannungsversorgung von  $\pm 5 \text{ V}$  trägt die Leistungsaufnahme eines MCM etwa 500 mW. Für den eingestellten Dynamikbereich von  $\pm 1.5 \text{ V}$  am symmetrischen  $100 \Omega$  Leitungsabschluss beträgt das effektive RMS-Rauschen  $\sigma \leq 0.8 \text{ LSB}$ . Vier digitale Datenkanäle, die der Übertragung von Kontroll- und Zeitinformationen zum MCA dienen, bilden zusammen mit den 20 Analogkanälen einen 24 Bit breiten Datenbus. Eine nachgeschaltete 24:12 Multiplexstufe fasst die Datenströme von zwei benachbarten Kanälen alternierend zusammen und bildet so einen parallelen, 12 Bit breiten Datenausgang, auf den über eine Steckerleiste am oberen Modulende zugegriffen werden kann. Der Gesamtdatendurchsatz über diese Steckverbindung beträgt etwa 1.8 Gbit/s. Über einen zweiten Steckverbinder lassen sich bis zu 14 externe Spannungsquellen zur Versorgung der vorgeschalteten Detektormodule anschließen. Entsprechende Filternetzwerke und zusätzliche A/D-Wandler auf der Mutterkarte dienen der Filterung und digitalisierten Spannungsmessung.

Kontrolliert wird das Gesamtmodul über einen asynchronen, 24 Bit breiten Datenbus. Die externe Modulsteuerung und Spannungsversorgung erfolgt über den zweiten Steckverbinder am oberen Ende der Mutterkarte. Mit Hilfe eines 7-zelligen Detektormoduls (siehe

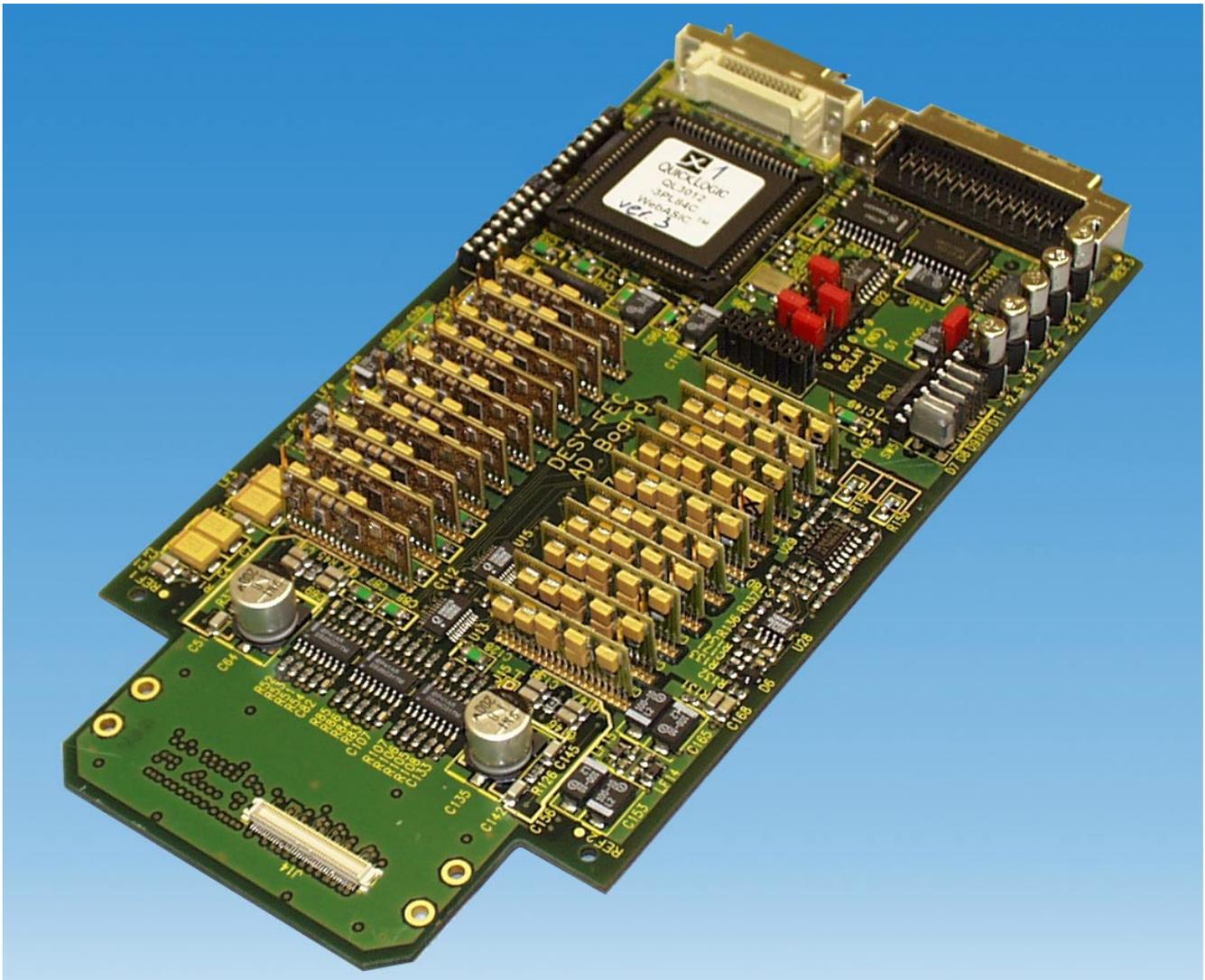


Abbildung 81: A/D-Wandler-Modul des Silizium-Driftdetektorsystems.

Jahresbericht 1999) und des MCA konnte die prinzipielle Eignung dieses Wandlermoduls auch unter den experimentellen Rahmenbedingungen am HASYLAB nachgewiesen werden. Weitere Systemtests im Zusammenspiel mit allen Systemkomponenten sowie die Weiterentwicklung der Software sind für das kommende Jahr vorgesehen.

## H1-BPC Ausleseelektronik

Das H1-Experiment wird derzeit um eine Proportional-kammer zur Messung des Winkels tiefunelastisch gestreuter Elektronen (BPC) für die HERA-Luminositäts-erhöhung 2000/2001 erweitert.

Im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte die Gruppe FEC die Ausleseelektronik unter besonderer Berücksichtigung eines reduzierten Verkabelungsaufwandes für Signale von insgesamt 5200 Drähten. Das zugrunde liegende Auslesekonzept basiert auf dem Einsatz der 128-kanaligen, integrierten CMOS-Schaltung vom Typ APC128. Dieser Chip enthält die Vorverstärker und nachgeschalteten Analogwertspeicher sowie einen Multiplexer zur seriellen Datenauslese und ermöglicht so bereits chipseitig eine sequentielle Auslese

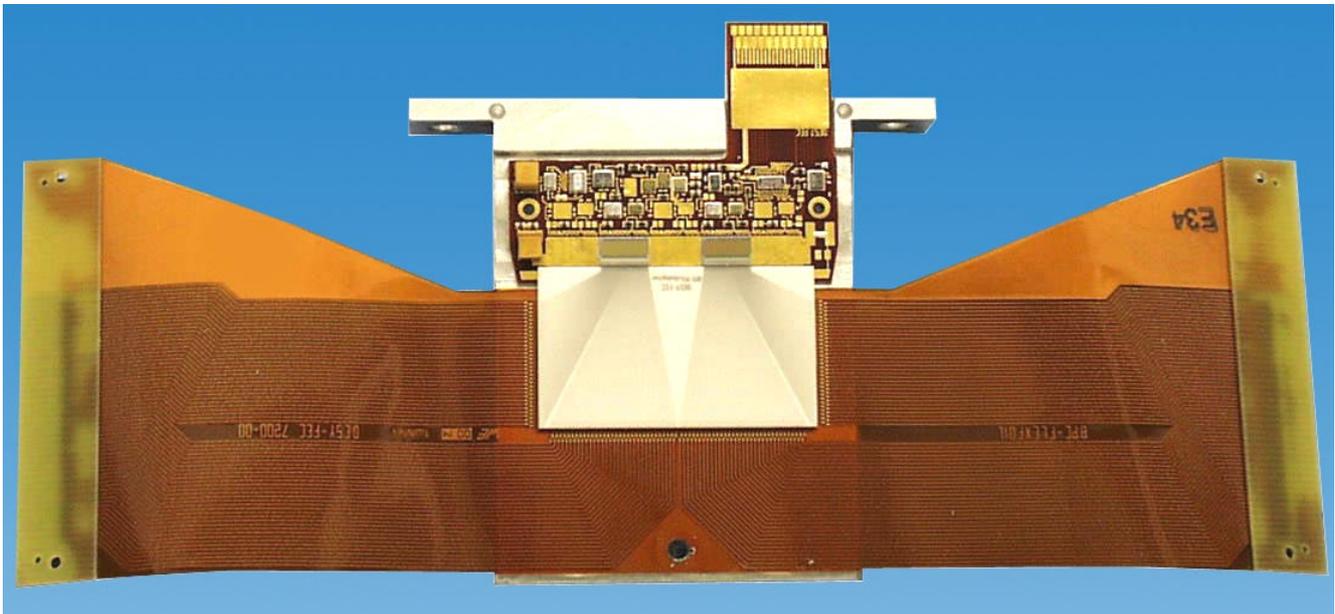


Abbildung 82: Foto der Front-End-Ausleseelektronik der H1-, „Backward Proportional Chamber“ (BPC).

von 128 Detektorkanälen. Der hybriden Aufbautechnik lag die Forderung nach einem 50-fachen Fan-In zugrunde, um den Abstand der Kammerdrähte von 2.5 mm an den Padabstand des Auslesechips von 50  $\mu\text{m}$  adaptieren zu können. Abbildung 82 zeigt die Fotografie des entwickelten Gesamtaufbaus.

Ein Grundträger aus Aluminium trägt eine Hybridschaltung mit zwei APC128 und eine „flügelartige“, flexible Anschlussfolie zur elektrischen Anbindung an die Drahtkammer-Anschlussleiterplatte. Eine Vielzahl von Bondverbindungen und 15  $\mu\text{m}$  breite Leiterbahnen aus Aluminium auf einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik (in Bildmitte) verbinden die Eingangspads der Chips auf der Hybridschaltung mit den folienseitigen Anschluss pads an der unteren und an den seitlichen Kanten des Keramikträgers.

Diese Gesamtanordnung wird zum Schutz der Bondverbindungen abschließend durch einen Deckel abgedeckt (nicht gezeigt). Zwei Plättchen aus FR4-Material versteifen die äußeren Folienenden, um ihre rückseitige Bestückung mit zwei 180-poligen Steckverbindern in Feinstleiter-SMD-Technik zu vereinfachen. Entsprechende Buchsenleisten befinden sich auf der Anschlussleiterplatte der Drahtkammer.

Der analoge Ausgang sowie sämtliche digitalen Steuerkanäle im oben herausstehenden Anschlussbereich der Hybridschaltung bilden die elektrische Schnittstelle zur nachgeschalteten Auswerteelektronik. Sie kann mit Hilfe eines 24-poligen ZIF-Steckverbinders kontaktiert werden. Auf diese Weise werden insgesamt bis zu 256 Detektorkanäle mit einer maximalen Abtastrate von etwa 4 MS/s sequentiell über ein einziges Folienkabel ausgelesen.

Der Hybridschaltung lag die Vorgängerentwicklung eines organischen Mehrlagenträgers auf Polyimidfolienbasis des im Betrieb befindlichen H1-VLQ-Trackers (vgl. Jahresbericht 1998) zugrunde. Diese wurde für den neuen Einsatz modifiziert. Die Fertigung einer Kleinserie von 40 Modulen wird voraussichtlich im kommenden Jahr beendet sein.

## Verschiedene Entwicklungen

Zur Messung von Multibunch-Schwingungen in HERA wurde für die Gruppe MPY ein Clock-Generator entwickelt. In diesem Modul werden (abgeleitet von einem 208.166 MHz Referenz-Signal) diverse Referenz- und Synchronisationssignale erzeugt, die von den anderen

Modulen benötigt werden. Der Prototyp des Clock-Moduls befindet sich zur Zeit in der Fertigung.

Für das HERA-B Fast Control System wurden einige kleinere Weiterentwicklungen durchgeführt, die im Wesentlichen zur Erleichterung von Fehlerdiagnosen dienen. Der FE-Teil des Projektes wurde abgeschlossen und an die HERA-B Gruppe übergeben. HASYLAB und TTF wurden mit der Entwicklung von Elektronik zur differentiellen Signalübertragung unterstützt. Für die Strahltrajektorienmessung des TTF-Teststrahls wurden in Zusammenarbeit mit der Gruppe FDET Anfang 2000 zwei Prototypen einer hybrid integrierten Steuer- und Verstärkerelektronik mit jeweils vier orthogonal zueinander angeordneten Silizium-Pixeldetektoren fertiggestellt, deren Einsatz für 2001 geplant ist.

In einem zweiten EU-geförderten F&E-Vorhaben, das sich mit der Entwicklung und Realisierung eines Gasedetektor-Systems für hohe Zählraten und Dynamik befasst (unter anderem HASYLAB), entwickelt die Gruppe FEC den Messaufnehmer in Form einer 1280-kanaligen Anodenstruktur sowie die dazugehörige Hybridschaltung mit der detektornahen Ausleseelektronik. Diese Projektbeteiligung befindet sich derzeit noch im Anfangsstadium. Mit der Fertigstellung eines ersten Prototyps wird im kommenden Jahr gerechnet.

## Service-Tätigkeiten

Die Service-Gruppe (FEPOS) führte insgesamt etwa 670 Reparaturen elektronischer Geräte für verschiedene Gruppen bei DESY durch. Davon betrug der Anteil an EDV-Komponenten etwa 70%. Zusätzlich wurde der Geräteverleih im Elektronik-Pool betreut und im Rahmen der Altgeräteverwaltung für eine sinnvolle Verwertung bzw. Abgabe alter Elektronik gesorgt.

Von der Gruppe FEPOS wird ebenfalls die gesamte Hörsaal- und Seminarraum-Betreuung wahrgenommen, und es werden notwendige Erweiterungen bzw. Modernisierungen der Hörsaaltechnik im Audio- und Videobereich in Zusammenarbeit mit der Gruppe FEA durchgeführt. Zusätzliche Aufgaben waren Rechner-Administration für die Verwaltung und umfangreiche Geräte-Tests für die Auswahl von PC-Standardkomponenten in Zusammenarbeit mit dem Z-Bereich.

Von der Gruppe FEA wurden teilweise sehr umfangreiche Service-Tätigkeiten durchgeführt auf den Gebieten Terminalserver, ISDN und Videokonferenzanlagen. Die Betreuung des EDA-Systems (Mentor Graphics) hat im Berichtsjahr wiederum einen großen Teil der Service-Kapazität in Anspruch genommen. Um insbesondere die durch die intensivere Benutzung der Analog-Simulation und der FPGA-Entwicklung mittels VHDL stark zugenommenen Anforderungen an CPU-Leistung, Speichergröße und Plattenkapazität erfüllen zu können, wurde ein neuer SUN-Server angeschafft und installiert.

Ein Mitarbeiter von FEA unterrichtete alle betroffenen DESY-Auszubildenden auf dem Gebiet der Elektronik. FEPOS betreute einen Auszubildenden und einige Praktikanten.

Mitarbeiter von FEB waren an Wartungs- und Weiterentwicklungsarbeiten von ZEUS und HERA beteiligt. Einige Mitarbeiter beteiligten sich an der Rufbereitschaft für die HERA-Quenchprotection. Im Berichtsjahr wurden wiederum zwei Mitarbeiter von FEA abgestellt für Tätigkeiten bei H1, ein weiterer Mitarbeiter war nahezu vollständig für ZEUS tätig. Hier wurde eine zweite Version verschiedener Module für den Micro-Vertex-Detektor (MCX, IO- und Interrupt-Platine) fertig gestellt, die nun in die Fertigung gehen. Neben der eigentlichen Entwicklungstätigkeit wurden von der Gruppe FEA umfangreiche Layoutarbeiten für verschiedene DESY-Gruppen geleistet.

# Bibliothek und Dokumentation

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

Die Zentralbibliothek in Hamburg und die Bibliothek von DESY Zeuthen informieren ihre Benutzer elektronisch im World Wide Web (WWW) des Internet. Die Zentralbibliothek informiert darüber hinaus über die Neuerwerbungen der Bibliotheken von DESY Hamburg in den gedruckten „Bibliotheksmitteilungen“.

Sie verwaltet auch den Druck wissenschaftlicher DESY-Veröffentlichungen (in 2000 waren es 194 DESY-Berichte, 6 Diplomarbeiten und 54 Dissertationen, 1 Konferenzabhandlung, 13 Interne Berichte und 136 Publikationen in Fachzeitschriften) und führt gemeinsam mit der Bibliothek des Stanford Linear Accelerator Center SLAC einen Konferenzenkalender.

Die ordnungsgemäße Übertragung der elektronisch lesbaren Versionen der DESY-Berichte in die e-print-Archive des Los Alamos National Laboratory LANL wird überwacht.

Die gesamte Literatur zur Hochenergiephysik wird in enger Zusammenarbeit zwischen den Bibliotheken des SLAC und DESY dokumentarisch bearbeitet und in der Literaturdatenbank HEP, die Dokumente ab Mitte der siebziger Jahre enthält, bereitgestellt. Sie wird täglich aktualisiert und ist im WWW zugänglich.

Als anerkannte Ausbildungsstelle bildet die DESY-Zentralbibliothek Fachangestellte für Medien- und Informationsdienste der Fachrichtung Bibliothek aus und stellt Praktikumsplätze für Studenten des

Bibliothekswesens zur Verfügung. Im Jahr 2000 befanden sich eine Auszubildende im dritten, zwei Auszubildende im zweiten Lehrjahr. Ein Student der Fachhochschule Hamburg absolvierte in der Zentralbibliothek ein vierwöchiges, eine Studentin derselben Einrichtung ein achtwöchiges Informationspraktikum an wissenschaftlichen Bibliotheken. Ein Diplom-Physiker beendete Ende Februar seine zweijährige Ausbildung zum Wissenschaftlichen Dokumentar, eine Physikerin nahm sie Anfang April auf.

Die Infothek in der DESY-EXPO-Halle wurde von der Zentralbibliothek mit den dort angebotenen Informationsmedien ausgestattet.

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) und in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG).

## 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 27 100 Bücher wurden Ende 2000 über den gemeinsamen OPAC (Online Public Access Catalogue) nachgewiesen.

Die Institutsbibliothek im HASYLAB enthält im Wesentlichen Literatur zur Festkörperphysik. Der Bestand umfasst etwa 1200 Bücher (ohne Zeitschriftenbände). Erwerbung und Katalogisierung werden von der Zentralbibliothek durchgeführt. Für die Benutzung gelten laborinterne Regelungen.

	Zugang	Löschungen	Bestand (31.12.2000)
Monographien	827	450	27 743
Gebundene Zeitschriftenbände	1261	—	26 915
Laufend gehaltene Zeitschriften	14	11	398*
Zeitschriften (Verwaltung)	1	1	31**
elektronische Zeitschriften	28	1	604

\* zzgl. 21 Abonnements von Tages-/Wochenzeitungen

\*\* davon 12 Abonnements von Zeitungen

Tabelle 5: *Entwicklung des Bibliotheksbestands in 2000.*

Die Bücherei der Abteilung MKS enthielt Ende 2000 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 1900 Leser regelmäßig die Zentralbibliothek. Sie verursachten durchschnittlich 100 Ausleihvorgänge pro Woche. Im nehmenden Leihverkehr wurden 552, im gebenden 234 Literaturbestellungen positiv bearbeitet. Die Entwicklung des Bibliotheksbestands im Berichtszeitraum zeigt Tabelle 5.

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 Bibliothek bequeme Zugriffsmöglichkeiten auf ihren WWW-Seiten.

Der HGF-Arbeitskreis Bibliotheks- und Informationswesen führte auch in 2000 für die HGF-Einrichtungen Verhandlungen mit Verlagen, Agenturen und Infor-

mationsdienstleistern über Konsortialverträge für den gemeinsamen Zugang zu den elektronischen Versionen der abonnierten Zeitschriften und zu Literatur- und Faktendatenbanken. Mit der Verlagsgruppe Academic Press wurde der Vertrag im Herbst 2000 unterzeichnet. Insgesamt konnte im Berichtsjahr auf die Inhaltsverzeichnisse, Kurzfassungen und Volltexte der Veröffentlichungen in 604 elektronischen Zeitschriften zugegriffen werden.

Die Zentralbibliothek und die Bibliothek von DESY Zeuthen arbeiten mit der integrierten Bibliothekssoftware ALEPH-500. Nach der Katalogisierung und Ausleihe wurde ab 2000 auch das Modul für die Erwerbung eingesetzt.

## Bibliothek von DESY Zeuthen

Diese Bibliothek wird von 220 Lesern regelmäßig genutzt. Sie konnten sich Ende des Berichtsjahres aus 8453 Monographien und 7898 Zeitschriftenbänden informieren. 93 Zeitschriftentitel sind abonniert. Im Berichtsjahr wurden etwa 150 Literaturstellen im nehmenden Leihverkehr besorgt, 73 davon von der Zentralbibliothek in Hamburg.

## Infothek in der DESY-EXPO-Halle

Die Zentralbibliothek stattete die Infothek der DESY-EXPO mit mehr als 400 Büchern, CDs und Videos

aus. Diese wurden von einer Gruppe von Mitarbeitern des HASYLAB, des M-Bereichs und der Gruppe L ausgewählt und von der Zentralbibliothek beschafft. Sie umfassten ein weites Spektrum von Wissensgebieten: Von Atom-, Kern- und Teilchenphysik über Astrophysik, Relativitätstheorie, Optik und Laser, Geschichte der Physik und Biografien bis hin zu anderen Naturwissenschaften, Mathematik und Philosophie. Neben Fach- und Lehrbüchern fanden sich populärwissenschaftliche Abhandlungen sowie Kinder- und Jugendbücher. Auch an der räumlichen Ausgestaltung der Infothek war die Gruppe L beteiligt. Das dort installierte elektronische Zugangskontrollsystem wurde nach Ende der EXPO von der Zentralbibliothek übernommen.

## Dokumentation

Die Gruppe „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. Ihre Hauptaufgabe ist aber die schnelle Bereitstellung von Informationen über neu erschienene Forschungsberichte, Publikationen in Fachzeitschriften, Lehrbücher, Monographien und Konferenzabhandlungen.

## Literaturdatenbank HEP

Die Literaturdatenbank HEP wird gemeinsam mit der SLAC-Bibliothek, der weitere Fachbibliotheken weltweit zuarbeiten, erstellt.

Im Jahr 2000 hat die Gruppe „Dokumentation“ für die Datenbank HEP 2078 Publikationen in Fachzeitschriften und Konferenzabhandlungen und 8481 Forschungsberichte und Vorabdrucke klassifiziert und indexiert. Von weiteren 7230 Publikationen und 1348 Forschungsberichten wurden, um sie in der Datenbank schnell nachzuweisen, zunächst nur die bibliographischen Angaben erfasst. Für 8619 bereits

dokumentierte Berichte wurden nach ihrer Veröffentlichung Publikationsvermerke hinzugefügt.

Die Datenbank ist mit Installationen in USA (SLAC), Europa (DESY und Durham) 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 dokumentarisch bearbeitet worden sind.

Bei der Katalogisierung von Artikeln in elektronisch verfügbaren Zeitschriften werden zunehmend online erhältliche bibliographische Daten der Verlage ausgewertet. Viele Zeitschriftenartikel sind deshalb schon vor Erscheinen der gedruckten Version in der HEP-Datenbank nachgewiesen.

Die Zusammenarbeit in der Literaturdokumentation mit den Bibliotheken des SLAC und des Europäischen Laboratoriums für Teilchenphysik CERN in Genf wurde fortgesetzt. Ein Mitarbeiter der SLAC-Bibliothek statete im Oktober 2000 der DESY-Dokumentation einen einwöchigen Arbeitsbesuch ab.

## Informationsangebot

Der Zugriff auf die Literaturdatenbank HEP ist über das WWW möglich. Auf die DESY-residenten Daten wurde im Berichtsjahr mit 307 000 Recherchen zugegriffen. Über die Web-Seite der DESY-Bibliothek erhält man auch Zugang zum gemeinsamen elektronischen Online-Katalog aller Bibliotheken am DESY (in 2000 mit 9800 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.



Abbildung 83: Die vier Bilder dokumentieren die Höhepunkte in der Öffentlichkeitsarbeit des Jahres 2000: Die DESY-EXPO „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“, die vom 1. Juni bis 31. Oktober in Hamburg stattfand und mehr als 106 000 Besucher anzog (oben links); die Festveranstaltung „Einheit der Vielheit“ zum 40-jährigen DESY-Jubiläum am 23. Mai, auf der zahlreiche Ehrengäste aus Politik und Wissenschaft, angereist aus dem In- und Ausland, und mehr als 2000 Teilnehmer aus der „DESY-Welt“ begrüßt werden konnten (oben rechts); die Ausstellung „Reise zum Urknall“ im April in Berlin, eine der Zentralveranstaltungen des „Jahres der Physik“, auf der reges Treiben herrschte (unten links); den Einzug des Schulprojekts „physik.begreifen@desy.de“ in den von der Hamburger Schulbehörde gestellten neuen Pavillon (unten rechts).

# Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

**Die DESY-Öffentlichkeitsarbeit stand im Berichtsjahr unter zwei besonderen „Sternen“: Das Jahr 2000 wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmb+f) zum „Jahr der Physik“ ernannt, und im gleichen Jahr wurde vom Stifterverband der Deutschen Wissenschaft zusammen mit den Wissenschaftsorganisationen die Initiative „Wissenschaft im Dialog“ gegründet. Gerade die physikalisch ausgerichteten Forschungszentren waren gefordert, ihre Themen in der Öffentlichkeit offensiv und mit besonderen Maßnahmen zu kommunizieren.**

**Der intensive Dialog mit der Öffentlichkeit war für DESY schon immer eine Herausforderung, die gerne und mit großem Einsatz angenommen wurde. Die Abteilung „Presse- und Öffentlichkeitsarbeit“ (PR) erfüllt hier die Funktion einer „Schnittstelle“ und sorgt für den nötigen Informationsfluss, wobei sie stets mit der vollen Unterstützung aller DESY-Abteilungen rechnen kann. Gerade so ein Projekt wie die fünfmonatige EXPO-Ausstellung wäre zum einen ohne die unkomplizierte und schnelle Zuarbeit der Service-Gruppen nicht durchführbar gewesen, und zum anderen ohne die engagierte Dialogbereitschaft der DESY-Wissenschaftler aus Hamburg und Zeuthen nicht zu so einem Erfolg geworden.**

Im Berichtsjahr mussten alle PR-Ressourcen auf die Verwirklichung des EXPO-Projekts fokussiert werden, das heißt auf die Vorbereitung und Durchführung der Ausstellung „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“. Sie fand vom 1. Juni bis 31. Oktober bei DESY in Hamburg statt und war in diesen fünf Monaten bei freiem Eintritt an allen 153 Tagen von 10 bis 19 Uhr geöffnet, an den Donnerstagen bis Mitternacht. Basierend auf dem Konzept, das schon im Wissenschaftlichen Jahresbericht 1999 beschrieben wurde, wurde die Ausstellung ab Februar in der gerade fertig gestellten Experimentierhalle, in der ab 2004 mit

dem neuen FEL (Freie-Elektronen Laser) experimentiert wird, aufgebaut. Parallel dazu liefen die Herstellung bzw. Überarbeitung von insgesamt 66 Exponaten sowie die Abwicklung für 23 Leihgaben, die Produktion von vier neuen Computeranimationen zu TESLA-Themen sowie von drei Videofilmen, die Gestaltung (Bilder und Text) der etwa 1000 m<sup>2</sup> Wandflächen, die Herstellung einer über Computer zugänglichen virtuellen Ausstellung mit Hintergrundinformationen als „interaktive Wissensinsel“, der beiden Bild-Großprojektionen „Menschen bei DESY“ und „Lichterscheinungen“, der Stehbücher mit weiterführenden Informationen zu den Ausstellungsthemen sowie des Internet-Auftritts, die Erarbeitung und erste Umsetzung des Werbe- und Bekanntmachungskonzepts, die Auswahl und Schulung der 89 „Animationsstudenten“ (Ausstellungsbetreuer), die Auswahl der Veranstaltungen des Event-Programms für die 22 Donnerstage sowie die Erledigung der vielen, vielen „Kleinigkeiten“, die letztlich für einen reibungslosen Ausstellungsbetrieb sorgen. Dieses umfangreiche Aufgabenspektrum konnte durch die gute Zusammenarbeit mit einer Vielzahl professioneller Firmen und den Einsatz von insgesamt etwa 400 DESY-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeitern erfolgreich bewältigt werden.

## Rückblick auf die DESY-EXPO

Mehrere Kriterien belegen den Erfolg der DESY-EXPO „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“. Dazu gehört die über Erwartung hinausgehende Zahl von mehr als 106 000 gezählten Besucherinnen und Besuchern und vor allem das breite Besucherspektrum (Abb. 84), das sich angesprochen fühlte, die überwiegend sehr positiven Rückmeldungen, die hohe Akzeptanz bei den DESY-Mitarbeitern und Gastwissenschaftlern sowie die Tatsache, dass dieses Ausstellungsprojekt von mehreren führenden Hamburger Persönlichkeiten zum

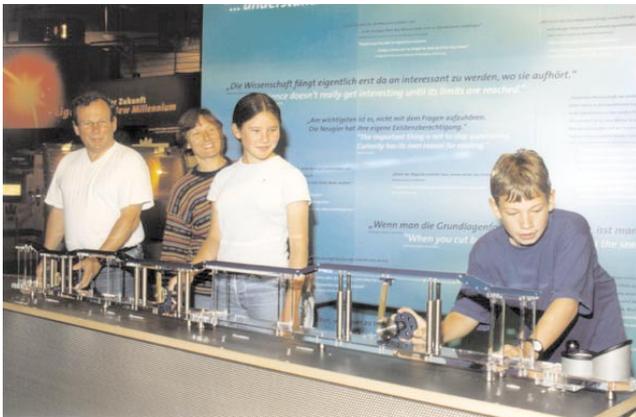


Abbildung 84: Bilder aus der EXPO-Ausstellung „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“: am Kugel-Linearbeschleuniger (oben links), bei einer Führung durch einen DESY-Wissenschaftler (oben rechts), beim Bearbeiten des Schüler-Rallyebogens (unten links), bei einem der Donnerstags-Vorträge im Veranstaltungszelt (unten rechts).

Anlass genommen wurde, die Initiative für ein „Science Center“ in Hamburg zu ergreifen. Sehr schnell zeigte es sich, dass der EXPO-Erfolg ganz wesentlich mit den Möglichkeiten zum Dialog verknüpft war, der mit den DESY-Wissenschaftlern (Führungen), den DESY-Doktoranden und -Diplomanden (Kurzvorträge) und den Physikstudenten von 31 Universitäten (Ansprechpartner) geführt werden konnte.

Aus Beobachtungen während des Ausstellungsbetriebs, vielen Einzelgesprächen, den Befragungen von 117 Lehrern sowie 786 Besuchern und der Auswertung der beiden Gästebücher können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Das Besucherspektrum reichte „von acht bis achtzig“, was sich besonders an den

Wochenenden und Feiertagen zeigte, die mit durchschnittlich 500 bis 850 Tagesgästen besonders hoch frequentiert und an denen Familien in der Überzahl waren, und die Atmosphäre war durchgängig von einer aufgeschlossenen und freundlichen Stimmung geprägt.

In der nicht-schulfreien Zeit kamen mehr als 450 Schulklassen, davon etwa die Hälfte aus Hamburg, wobei die Jahrgänge 8 bis 13 in der Mehrzahl waren. Es zeigte sich sehr schnell, dass die von den DESY-Wissenschaftlern durchgeführten Führungen durch die Ausstellung besonders bei den Jahrgängen 11 bis 13 auf positive Resonanz stießen. Von den Jüngeren wurde der Rallyebogen mit Fragen zu den Ausstellungsthemen sehr gut angenommen. Insgesamt wurden etwa 8500 Rallyebögen

### A) Was hat Ihren Schülern besonders gut gefallen?

(Befragung von 117 Lehrern – Mehrfachnennungen möglich – 16 machten keine Angabe)



### B) Was hat Ihren Schülern nicht gefallen?

(Befragung von 117 Lehrern – Mehrfachnennungen möglich – 16 machten keine Angabe)

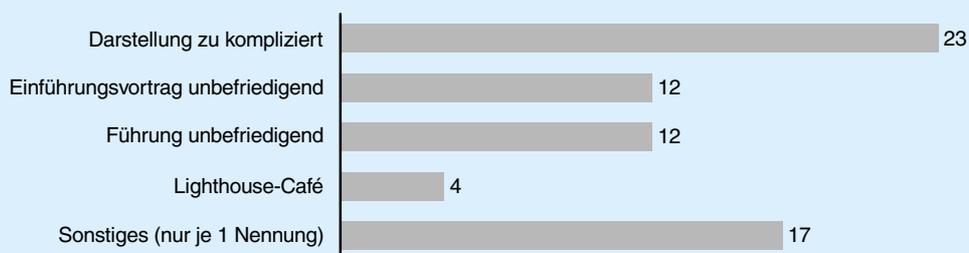


Tabelle 6: Ein Ergebnis der Befragung von 117 Lehrern, die mit ihrer Klasse die DESY-EXPO „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“ besuchten. A) Die offene Frage lautete: „Was hat Ihren Schülern besonders gefallen?“ B) Die offene Frage lautete: „Was hat Ihren Schülern nicht gefallen?“

ausgegeben. Vereinzelt waren auch Grundschulklassen oder Kindergarten-Gruppen vertreten, die dann allerdings von ihren Betreuern angeleitet wurden. Etwa 88% der befragten 117 Lehrer gaben an, dass die EXPO „gut“ oder „sehr gut“ für den Jahrgang ihrer Schüler geeignet sei, 12% antworteten mit „geht so“, 85% bin-

den die Ausstellungsthemen in ihren Unterricht ein und 45% waren mehr als einmal in der DESY-EXPO. Bei der offenen Frage, was den Schülerinnen und Schülern besonders gefallen hat, betreffen 109 von den 162 gegebenen Antworten die interaktiven Modelle und Experimente (Tab. 6A); unter den Dingen, die nicht gefallen

### Wie haben Sie von der Ausstellung erfahren?

(Befragung von 786 Besuchern – Mehrfachnennungen möglich)

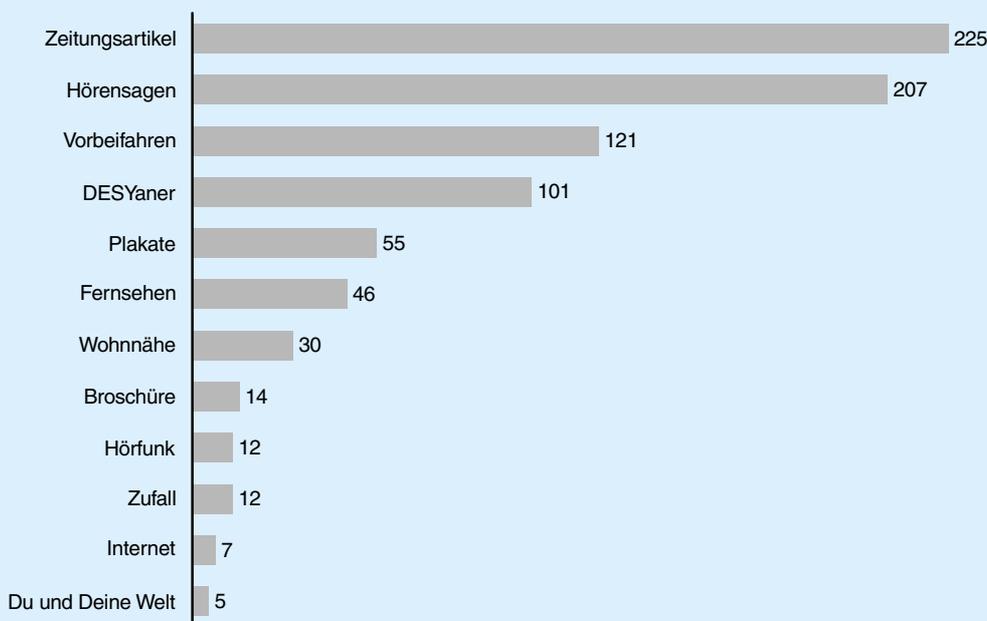


Tabelle 7: Ein Ergebnis der Befragung von 786 Besucherinnen und Besuchern nach ihrem Rundgang durch die DESY-EXPO „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“. Die Frage lautete: „Wie haben Sie von der Ausstellung erfahren?“

haben (Tab. 6B) wurde an erster Stelle die komplizierte Darstellung genannt.

Von den 786 interviewten Besuchern kamen 63% aus Hamburg und 20% waren schon mehr als einmal in der DESY-EXPO. Die Ausstellung hat nur 4.2% der Befragten „gar nicht“ oder nicht besonders gut („geht so“) gefallen. Wie auch bei der Lehrerbefragung wurden die Möglichkeiten, an den Exponaten selber etwas machen zu können, mit Abstand an erster Stelle genannt. An zweiter Stelle rangierte der FEL-Tunnel (Authentizität) und an dritter Stelle die Führungen durch die DESY-Wissenschaftler. Zu dem Punkt, was nicht gefallen hat, äußerten sich 660 Befragte (knapp 85%) gar nicht, der Rest fand zum Beispiel die Darstellungen zu kompliziert (31 Nennungen). Von besonderem Interesse war die Art, wie die Besucher von der Ausstellung erfahren hatten (bei dieser Frage waren Mehr-

fachnennungen möglich). Hier spielten die „Mund-zu-Mund-Propaganda“ mit insgesamt 34% sowie die Medien (Zeitungen, Hörfunk und Fernsehen) mit insgesamt 26% die Hauptrolle (Tab. 7). Das Internet (0.8%) war als Erstkontakt dagegen weniger wirksam.

Die Auswertung der beiden Gästebücher ergab ein differenziertes Besucher-Meinungsbild, in dem die positiven Äußerungen zur Verständlichkeit der Themen-Aufbereitung, zu Gestaltung und Atmosphäre, dem Exponat-Angebot und der Ausstellungsbetreuung den weitaus größten Raum einnahmen. So tauchten immer wieder Begriffe auf wie „super“, „aufregend“, „begeistert“, „für jeden etwas“, „allgemein verständlich“, „sehr informativ“, „zum Wohlfühlen und stundenlang hier bleiben“, „sehr gut zu verstehen“, „lebendig“ und „... macht Spaß“. Einige als typisch zu bezeichnende Beispiele seien hier genannt: „Eine Super-Ausstellung:

lehrreich, spannend, unterhaltsam. Auch das „Drumherum“ ist sehr schön. Die Ausstellung müsste eigentlich dauerhaft existieren.“ oder: „Besser als im Museum. Hier darf man alles anfassen und buchstäblich begreifen!“ oder: „Dank kompetenter Führung durch junge Physiker auch für Laien hochinteressant und anregend.“ Demgegenüber gab es aber auch Kritikpunkte, die belegen, dass es schwierig ist, die ganze Spannweite der Adressaten anzusprechen: „Mehr Infos für vorgebildete Besucher wären mir noch lieber gewesen.“ oder: „Leider keine einzige Formel.“ oder: „Die Informationsfülle erschlägt einen.“ Besonders von Jugendlichen, die mit ihrer Klasse gekommen waren, fanden sich Bemerkungen wie „extrem langweilig“, „gefällt nicht“ oder „(Wissenschaft) geht auf die Nerven“, wobei in der Regel „abgesehen vom Internet-Café“ ergänzt wurde.

Wegen ihrer langen Laufzeit war die Ausstellung ursprünglich als selbsterklärend konzipiert. Den Besuchern sollte es prinzipiell möglich sein, sich alle Informationen allein durch die Ausstellungsmedien (Exponate, Bild-Text-Tafeln, Wissensinseln und Stehbücher) selbst zu beschaffen. Geplant war allerdings der Einsatz von jeweils zwei Physikstudierenden in den beiden Hallen-Ebenen und im Tunnel, die als Ansprechpartner fungieren, aber auch zur Bedienung der interaktiven Experimente animieren sollten. Gerade der Einsatz dieser sehr engagierten jungen Menschen, deren Begeisterung für Physik und die dargestellten Themen auf die Besucher übersprang, war ein ganz wichtiger Faktor für den Ausstellungserfolg und wurde auch in den Gästebüchern sehr häufig positiv erwähnt. Als mindestens ebenso wichtig erwies sich dann aber auch der direkte Dialog mit den DESY-Wissenschaftlern bei den insgesamt etwa 1500 Führungen, die regelmäßig fünfmal am Tag und an den Donnerstagen zusätzlich um 21.30 Uhr angeboten werden konnten. Angeregt durch die Erfahrungen bei der Ausstellung „Reise zum Urknall“, die im April 2000 in Berlin stattfand (siehe unten), gelang es einem DESY-Wissenschaftler kurzfristig, 106 seiner Kolleginnen und Kollegen in Hamburg und Zeuthen zu motivieren, angemeldete oder sich ad-hoc bildende Besuchergruppen durch die Ausstellung zu führen. Abgerundet wurde die inhaltliche EXPO-Betreuung dann auch noch durch die sechsmal am Tag stattfindenden Kurzvorträge über DESY und die EXPO-Themen, die von DESY-Doktoranden und -Diplomanden gehalten wurden und an denen ins-

gesamt 19 000 Besucherinnen und Besucher teilnahmen. Rückblickend betrachtet muss gesagt werden, dass es auf Grund der Unanschaulichkeit und Komplexität der Themen nur in einem begrenzten Maße gelingen konnte, die Inhalte selbsterklärend darzustellen. Hinzu kommt, dass sich besonders für die nicht vorinformierten, manchmal auch skeptischen Laien der Zugang zur Wissenschaft erst dann öffnet, wenn sie authentisch und überzeugend, also im wahrsten Sinne des Wortes „lebendig“, von den Forschern direkt kommuniziert wird. Deshalb wäre es ohne die Aufnahme der Führungen und Kurzvorträge in das Betreuungskonzept sicherlich nicht zu dem großen Erfolg der DESY-EXPO gekommen.

Auch das EXPO-Begleitprogramm, das an jedem der 22 Donnerstage auf dem Platz vor der Halle, in einem daneben aufgestellten Veranstaltungszelt oder im DESY-Hörsaal stattfand, trug wesentlich zum Ausstellungserfolg bei und war vom Dialog zwischen Wissenschaft und Publikum geprägt. Es bestand aus vier Veranstaltungsarten, die nach kurzer Zeit ihr Stammpublikum hatten. Höhepunkte waren die fünf Aktionstage zu den DESY-spezifischen Themen „Vakuum“, „Reinraum und Materialprüfung“, „Strahlung und Wellen“, „Temperatur und Supraleitung“ und „Bauen und Vermessen“, die Markt-Charakter hatten und bei denen Vorführungen und Experimente im Mittelpunkt standen. Diese Aktionstage wurden von den jeweiligen DESY-Gruppen vorbereitet und durchgeführt und erfreuten sich mit durchschnittlich 1680 Gästen besonderer Beliebtheit. Zum Thema „Vakuum“ war es außerdem gelungen, ein besonders eindrucksvolles Abschluss-Event zu organisieren, das trotz des schlechten Wetters etwa 3000 Besucher anzog: Die Vorführung des historischen Magdeburger Halbkugel-Versuches, mit dem Otto von Guericke 1656 die Existenz des Vakuums und die Kraft des Luftdrucks bewiesen hatte, und zwar indem 16 Pferde versuchten, die beiden Halbschalen einer evakuierten Kupferkugel auseinander zu ziehen. Ähnliche Abschluss-Höhepunkte waren ursprünglich für alle fünf Aktionstage geplant, konnten aber wegen fehlender themenbezogener Events nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurden an zwei Abenden als Ausklang Musikveranstaltungen angeboten, die aber nicht auf große Resonanz stießen.

Eine zweite Veranstaltungsart waren Experimentalvorträge, die einmal im Monat stattfanden und von DESYs

„Innerbetrieblicher Fortbildung“ durchgeführt wurden. Hier standen Vorführungen von physikalischen Phänomenen im Mittelpunkt, die vom Vortragenden publikumsnah erklärt wurden. Mit durchschnittlich 400 bis 600 Besuchern stießen diese Veranstaltungen ebenfalls auf große Resonanz. Acht populärwissenschaftliche Diskussionsvorträge zu Themen aus der Teilchenphysik bildeten die Reihe „2000 – Das Jahr der Physik, Reise zum Urknall“. Auch hier überraschte der große Kreis von in der Regel 400 interessierten Zuhörern, von denen viele häufig noch lange mit dem Vortragenden über das Gehörte diskutierten. Einmal kam es allerdings vor, dass sich das Vortragsniveau eher an Experten richtete als, wie angekündigt, an Laien. Dies wurde dann auch vom Publikum kritisch angemerkt. Zu der Kategorie „Sonderveranstaltungen“ gehörten zum Beispiel die Auftritte des DESY-Orchesters oder des St. Petersburger Chores, die bei DESY schon Tradition haben und das EXPO-Programm bereicherten. Insgesamt besuchten über 19 000 Menschen die Donnerstags-Veranstaltungen, von denen schätzungsweise die Hälfte anschließend noch in die Ausstellung ging. Der „lange Donnerstag“ hat sich also als sehr gute Maßnahme erwiesen, einige Gäste hätten sich sogar gerne länger als 24 Uhr in der Ausstellung aufgehalten.

### Andere PR-Maßnahmen

Auch bei der Initiativ-Pressearbeit stand im Berichtsjahr die DESY-EXPO mit ihrem Schwerpunkt, dem Röntgenlaser, im Mittelpunkt. Die Medienauswertung belegt das große Interesse der Presse an diesem Thema: Es gab auf regionaler Ebene 77 Zeitungs-, 14 Fernseh- und mindestens 20 Hörfunk-Beiträge. Überregional erschienen 18 Artikel in Zeitungen und 25 in anderen Print-Medien, und es wurden vier Fernsehbeiträge gesendet (die Radiosender konnten nicht ausgewertet werden). Besonders erwähnt werden muss eine achtseitige DESY-Sonderbeilage des Hamburger Abendblatts zur 40-Jahr-Feier am 23. Mai sowie zwei Wissenschaftsforen zu DESY-Themen, von denen eins in dem EXPO-Veranstaltungszelt stattfand. Diese öffentlichen Foren wurden gemeinsam vom Hamburger Abendblatt sowie dem Norddeutschen Rundfunk (Fernsehen und Hörfunk) durchgeführt mit anschließender ausführlicher Berichterstattung in allen drei Medien.

Die DESY-EXPO wurde zum Anlass genommen, zwei neue Broschüren in deutscher und englischer Sprache herzustellen, die sich beide an die breite Öffentlichkeit richten und als EXPO-Begleitmaterial zur Verfügung standen: „... vom Ursprung der Materie zu den Grundlagen des Lebens“ ist der Titel der TESLA-Broschüre, in der alle wichtigen Aspekte dieses internationalen Beschleuniger-Projekts beschrieben sind: die Fragen der Teilchenphysik und die Forschungsschwerpunkte mit den Röntgenlasern, aber auch das geplante Forschungszentrum in Ellerhoop sowie das neue Organisations- und Finanzierungsmodell. Im Mittelpunkt der HASYLAB-Broschüre stehen die Eigenschaften und die Anwendungsvielfalt der Synchrotronstrahlung, die mit einer Reihe von Beispielen aus verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen illustriert sind. Rechtzeitig zu der 40-Jahr-Feier erschien das DESY-Jahrbuch 2000, das vierte Heft in dieser Reihe, die seit 1993 in deutscher und englischer Sprache erscheint. Schwerpunkt-Themen dieser Ausgabe sind zum Beispiel die 40-jährige Geschichte DESYs mit mehreren Beiträgen, die Forschungen bei HERA mit den vier Experimenten und der TESLA-Röntgenlaser. Auch „DESY 2000“ wurde gegen eine geringe Schutzgebühr bei der EXPO angeboten.

Der erste Teil des TESLA-Unterrichtsmaterials, das 1999 von DESY bei einem Schulbuch-Verlag in Auftrag gegeben wurde, wurde zu Beginn des Berichtsjahres fertiggestellt. Dieser Teil befasst sich mit dem Röntgenlaser und konnte noch so kurzfristig produziert werden, dass der Ringbuchordner rechtzeitig vor Beginn der DESY-EXPO bundesweit bei allen 4200 Gymnasien, Gesamtschulen und Schulen mit gymnasialer Oberstufe sowie bei den Waldorfschulen eingegangen ist. Gegen Ende des Berichtsjahres wurde mit der Herstellung des zweiten Teils zur TESLA-Teilchenphysik begonnen, der als Ergänzungslieferung zu der dokumentierten Folienmappe vor den Sommerferien 2001 ausgeliefert werden soll. Das Unterrichtsmaterial enthält außer einer Serie von Overhead-Folien auch Schülerseiten mit Aufgaben und Hintergrund-Informationen für Lehrer. Es umfasst die Basisinformation zu DESY und Unterrichtseinheiten für drei Niveaustufen, die für Physik-Grundkurse und -Leistungskurse geeignet sind. Im Rahmen eines Rundschreibens zur DESY-EXPO wurden alle 22 000 Physiklehrer über die Möglichkeit informiert, das Material als Broschüre (zwei Bände)

gegen Erstattung der Versandkosten zu erwerben. Mit knapp 950 Bestellungen wurde hiervon bis Jahresende leider weniger als erwartet Gebrauch gemacht.

Das 1998 installierte Internet-Angebot „Kwork-Quark – Teilchenphysik für alle!“ mit der Adresse [www.desy.de/pr-info/Kworkquark/](http://www.desy.de/pr-info/Kworkquark/) erfreut sich immer größerer Beliebtheit und wird auch zunehmend von Physiklehrern im Unterricht eingesetzt. Bis Ende 2000 wurden in den 30 Monaten Laufzeit 32 000 echte Besuche gezählt, und es kommen durchschnittlich 15 e-Mails pro Monat, in denen besonders die klare und unterhaltsame Darstellung betont wird sowie die gute Navigierbarkeit. Im Berichtsjahr stand die KworkQuark-Adresse in zwei „Ranking-Lists“ von bedeutenden Zeitschriften und war eine von 2500 Internet-Adressen, die in einem in Buchform erschienenen „Internet-Guide für Schüler“ genannt wurden. Der Erfinder und Autor von KworkQuark, damals noch Physik- und Journalistik-Student, hat inzwischen eine Multimedia-Firma gegründet. Im Berichtsjahr wurde von dieser Firma das Konzept für eine zweite Version erstellt, das im folgenden Jahr umgesetzt werden soll. Ziel ist, dass KworkQuark **das** Wissensportal zur Teilchenphysik in Deutschland wird. Es soll ein halboffenes adaptierbares Lernsystem bieten und Vorreiter für virtuelle Lerneinheiten werden, die aus der Öffentlichkeitsarbeit eines Forschungsinstituts (DESY) im engen, elektronisch-geführten Dialog mit Fachlehrern erwachsen.

DESYs Beteiligung an der 91. Hauptversammlung des Deutschen Vereins zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU) in Stuttgart, der 47. MNU-Regionaltagung in Bremerhaven, der Hannover Messe im Rahmen der Präsentation der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) auf dem Stand des bmb+f sowie an der zehntägigen Verbrauchermesse „Du und Deine Welt“ in Hamburg war im Berichtsjahr ganz von der Werbung für das EXPO-Projekt geprägt. Dies gilt auch für den DESY-Auftritt beim „Global Dialog in Science and Technology“, einer einwöchigen Veranstaltung der EXPO 2000, die im Juli in Hannover stattfand. Im November präsentierte sich DESY mit der Vorstellung des industriellen HASYLAB-Angebots im Rahmen der „HiTech“-Veranstaltung in der Handwerkskammer Hamburg. Im selben Monat fand die HGF-Sonderausstellung „Abenteuer Wissenschaft“ im Deutschen Museum in München statt, auf der DESY zusam-

men mit der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI, Darmstadt) das Thema „Riesen und Zwerge“ gestaltete.

## PR-Maßnahmen anderer DESY-Gruppen

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

Als Erstes muss hier die Durchführung der zweiten Zentralveranstaltung zum „Jahr der Physik“ genannt werden, der Erlebnis- und Dialog-Ausstellung „Reise zum Urknall“ mit Themen aus der Teilchenphysik sowie der Hadronen- und Kernphysik. Sie fand vom 3. bis 9. April 2000 in der Urania in Berlin statt und wurde mit geschätzten 15 500 Besucherinnen und Besuchern zu einem großen Erfolg. Sie hatte zwei Elemente: Zum einen die „Reise zum Urknall“, beginnend mit einem großen Urknall-Graffiti, Exponaten zum Anfassen und aufwendigen Installationen. Außerdem wurde hinter dem Urania-Gebäude in einem Zelt die CERN-Roadshow gezeigt. Ergänzt wurde diese Ausstellung durch ein umfangreiches Vortrags- und Filmprogramm sowie ein Online-Forum. Die „Reise zum Urknall“ wurde im Namen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft durchgeführt und federführend von DESY Zeuthen und der Hamburger DESY-Gruppe „Forschung mit Lepton Collidern“ organisiert.

Für die Berliner Millennium-Ausstellung „7 Hügel – Bilder und Zeichen des 21. Jahrhunderts“, die vom 14. Mai bis 29. Oktober 2000 im Gropius-Bau gezeigt wurde, lieferte DESY Zeuthen für den Ausstellungsbe- reich „Kerne“ einige zentrale Exponate zur Teilchenphysik. In diesem Zusammenhang wurde in Zeuthen auch eine neue Funkenkammer gebaut, die jetzt für die eigene Öffentlichkeitsarbeit zur Verfügung steht. Außerdem war DESY Zeuthen im Berichtsjahr mit einem Stand auf der Internationalen Luft- und Raumfahrt- ausstellung ILA 2000 vertreten sowie beim „Tag der Wissenschaft und Forschung“ des Landes Brandenburg in Potsdam, der sich insbesondere an Schülerinnen und Schüler richtet. Bei mehreren Gelegenheiten

engagierten sich die Zeuthener Wissenschaftler mit all-gemeinverständlichen Diskussions-Vorträgen zur Teilchenphysik, von denen einer zum Thema „Was die Welt im Innersten zusammenhält – Die Entdeckungsreise in das Innerste der Materie“ vom DeutschlandRadio Berlin live übertragen wurde.

Das Projekt „physik.begreifen@desy.de“ wird mit pädagogischer Unterstützung der Hamburger Schulbehörde bei DESY durchgeführt und bietet zweimal in der Woche Schülerinnen und Schülern der 9./10. Jahrgangsstufe bei DESY die Möglichkeit, zum Thema „Vakuum“ einen Tag lang selbst zu experimentieren, einfache wissenschaftliche Zusammenhänge zu erarbeiten und dabei in DESYs Forschungsalltag „hineinzuschnuppern“. Im Berichtsjahr konnten, trotz einer mehrwöchigen Umbauphase, in der keine Veranstaltungen stattfanden, 970 Jugendliche an diesem Programm teilnehmen. Zusätzlich bekamen drei Gruppen aus Österreich und eine Gruppe aus Italien, die DESY im Rahmen einer Exkursion besichtigten, die Gelegenheit, einen Nachmittag lang zu experimentieren. Im Mai des Berichtsjahres konnte ein von der Hamburger Schulbehörde bereitgestellter Pavillon mit einer für das Projekt optimierten Infrastruktur bezogen werden, der so viel Platz bietet, dass eine Erweiterung des Programms möglich wird. Für das kommende Jahr sind deshalb zusätzliche Experimentiertage geplant, und zwar zum Thema „Radioaktivität“. Die Grundausstattung für dieses Thema wurde DESY von dem Betreiber der Ende 2000 geschlossenen Hamburger Einrichtung

„electrum“ zur Verfügung gestellt. Das Schulprojekt „physik.begreifen@desy.de“ stellte sich bei zwei öffentlichen Veranstaltungen vor: im September bei der Begleitausstellung des vom Stifterverband der Deutschen Wissenschaft in Bonn durchgeführten Symposiums „PUSH – Dialogpartner Wissenschaft“ und im November im Rahmen von „Physics on Stage“ beim CERN in Genf, einer Veranstaltung für Lehrer, die von der europäischen Initiative für Öffentlichkeitsarbeit in der Teilchenphysik (Outreach-Group) initiiert wurde.

An besonders physikinteressierte Schülerinnen und Schüler wendet sich die 1998 gegründete Seminarreihe „Faszination Physik“ – ein Treffpunkt und Diskussionsforum für junge Leute zu Themen der modernen Physik. Sie werden von den Jugendlichen aus einem vorgeschlagenen Katalog ausgesucht und unter Begleitung eines ehemaligen Physiklehrers dargeboten und diskutiert. Die Seminare, an denen inzwischen etwa 12 sehr engagierte junge Menschen regelmäßig teilnehmen, finden in der Schulzeit jeden Samstag nachmittag statt. Zu den im Berichtsjahr bearbeiteten Themen gehört zum Beispiel „Kreise im Magnetfeld – Bahnen von Elektronen und Sternenschiffen“ und „Schwarze Löcher sind schwarz – nach Hawking strahlen sie“. Mit vier Aufsätzen nahm die Arbeitsgemeinschaft an dem internationalen Internet-Wettbewerb „ThinkQuest“ ([www.thinkquest.org](http://www.thinkquest.org)) teil, und fünf Mitglieder der Gruppe hielten an drei Abenden öffentliche Vorträge zu ihren Themen.