

# Bereich Forschung (F)

## Inhalt

Übersicht	33
H1-Experiment	39
ZEUS-Experiment	53
HERMES-Experiment	67
HERA-B-Experiment	77
Forschung an Lepton Collidern	91
Theoretische Physik	97
Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB	103
Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie EMBL Außenstelle Hamburg	113
Max-Planck-Gesellschaft Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie	121
Elektronik-Entwicklung	127
Bibliothek und Dokumentation	133
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit	137

# Übersicht F-Bereich

## Experimentierbetrieb bei HERA

Im Berichtsjahr 1999 wurde HERA von Januar bis Dezember bei 27.5 GeV Elektronen/Positronen- und 920 GeV Protonen-Energie betrieben. Bis Juni wurden von jedem der beiden Experimente H1 und ZEUS Elektron-Proton-Daten entsprechend einer integrierten Luminosität von etwa  $15 \text{ pb}^{-1}$  und nach einer siebenwöchigen Unterbrechung Positron-Proton-Daten von etwa  $20 \text{ pb}^{-1}$  genommen. Die hohe Luminosität bei meist guten Strahlbedingungen machte 1999 zu dem bisher erfolgreichsten Betriebsjahr von HERA. Regelmäßige Unterbrechungen des Luminositätsbetriebs erlaubten dem HERA-B-Experiment, beinahe alle Detektorkomponenten zu installieren und in Betrieb zu nehmen. Ein Schwerpunkt des HERA-Betriebs lag in der Optimierung des gleichzeitigen Betriebs aller vier Experimente. Es mussten viele Kompatibilitätsprobleme gelöst werden, bis gegen Ende des Jahres ein effizienter, gemeinsamer Betrieb gelang.

Anfang 2000 wurde das HERA-Programm bis zum Beginn der Betriebsunterbrechung 2000 festgelegt: Betrieb mit Positronen bis Ende April 2000 und ab dann bis 4. September Betrieb mit Elektronen. Anschließend beginnt der Umbau von HERA und der Experimente mit dem Ziel, die Luminosität um einen Faktor vier bis fünf zu erhöhen und polarisierte Elektronen in drei Wechselwirkungszonen zur Verfügung zu stellen.

## Elektronen-Polarisation

Der Betrieb von HERA im Jahr 1999 zeichnete sich auch durch stabile und hohe Polarisation der Elektronen/Positronen aus, die für das HERMES-Experiment von entscheidender Bedeutung ist. Zum besseren Verständnis der systematischen Fehler wurde etwa einmal

pro Monat die Richtung der Polarisation am HERMES-Wechselwirkungspunkt umgekehrt. Der Wert der Polarisation wird mit Hilfe von zwei Compton-Polarimetern mit einer systematischen Genauigkeit von etwa 4% gemessen. Im Berichtsjahr wurden sehr große Fortschritte, besonders im Verständnis des longitudinalen Polarimeters, erzielt.

Nach der Betriebspause 2000 werden auch den Experimenten H1 und ZEUS longitudinal polarisierte Elektronen zur Verfügung stehen. Für eine präzise Messung der elektroschwachen Kopplungen und der empfindlichen Suche nach rechtshändigen geladenen Strömen muss eine Meßgenauigkeit von etwa 1% erreicht werden. Die Gruppe POL2000, die aus Mitarbeitern von HERA und allen an der Polarisation interessierten Experimenten besteht, hat einen entsprechenden Experimentierorschlag ausgearbeitet, der inzwischen vom Direktorium genehmigt wurde. Mit den vorbereitenden Arbeiten wurde begonnen.

## Die Experimente H1 und ZEUS

Beide Experimente fanden gute Strahlbedingungen vor und nahmen zuverlässig und effizient Daten. Probleme mit den H1-Spurkammern, die Ende 1999 auftraten, konnten inzwischen behoben werden. Die gesamte integrierte Luminosität mit Elektronen konnte verdreifacht werden und beträgt nun etwa  $18 \text{ pb}^{-1}$ , die für Positronen erreicht inzwischen etwa  $66 \text{ pb}^{-1}$ .

Mit der präzisen Messung der Wirkungsquerschnitte für neutrale und geladene Ströme bei Impulsübertragsquadraten zwischen 150 und 50 000  $\text{GeV}^2$  konnten die genauen Vorhersagen des Standard-Modells der Teilchenphysik auch in dem Bereich überprüft werden, in dem schwache und elektromagnetische Kräfte gleich stark sind. Die gute Übereinstimmung mit den Daten ist

ein großer Erfolg für die elektroschwache Theorie und die perturbative Quantenchromodynamik (QCD). Aus den Daten lässt sich eine obere Grenze für die Größe der Quarks und Elektronen von  $1.7 \cdot 10^{-16}$  cm, also einem Tausendstel des Proton-Radius, angeben, und neue Wechselwirkungen mit Energieskalen zwischen 2 und 5 TeV können ausgeschlossen werden. Der 1997 gefundene mögliche Überschuss von Ereignissen bei hohen Impulsüberträgen hat sich nicht verstärkt – für eine endgültige Klärung ist die höhere Luminosität nach dem Umbau im Jahre 2000 notwendig.

Bei kleinen  $Q^2$ -Werten und Partonimpulsanteilen  $x_{Bj}$  bis hinab zu  $2 \cdot 10^{-6}$ , dem Grenzbereich der Gültigkeit perturbativer QCD, wurde die Proton-Strukturfunktion  $F_2$  genau vermessen und mit verschiedenen Modellen verglichen. Weitere Untersuchungen zur QCD wurden durch die Messung der Wirkungsquerschnitte für Jet-Erzeugung, für die Erzeugung von Vektormesonen aus leichten sowie aus schweren Quarks und aus der Bestimmung des Energieflusses und der Impulsverteilung verschiedener Teilchen durchgeführt.

Beide Kollaborationen haben im Jahr 1999 intensiv an den Vorbereitungen für die Luminositätserhöhung gearbeitet, vor allem an Verbesserungen der Luminositätsmessung und der Spurdetektoren, an Präzisions-Vertexdetektoren sowie an Erweiterungen der Trigger.

### Das HERMES-Experiment

Das HERMES-Experiment nahm im Berichtsjahr 2.3 Millionen Ereignisse der tiefunelastischen Streuung polarisierter Elektronen an einem longitudinal polarisierten Deuterium-Target auf. Zusammen mit den Daten von einem polarisierten Proton-Target, die bereits 1996/97 genommen wurden, erlaubt dies die präzise Vermessung der Spinstruktur des Nukleons. Außerdem wurden Daten mit unpolarisiertem Deuterium, Stickstoff, Krypton sowie, als Vorbereitung für das Physikprogramm nach 2000, Testdaten mit einem transversal polarisierten Wasserstoff-Target genommen. Ende 1999 konnte durch eine lateral kleinere Targetzelle die Targetdichte um 50% erhöht werden. Seit Anfang 2000 werden mit diesem Target erfolgreich Daten genommen. Die HERMES-Kollaboration hat im Berichtsjahr ein Physikprogramm für die Jahre 2001 bis 2006 vorgestellt, das vom PRC sehr positiv begutachtet und vom Direktorium genehmigt wurde.

Zu den wichtigsten physikalischen Ergebnissen zählen ein erster Hinweis auf den Gluonen-Beitrag zum Nukleon-Spin und die experimentell erstmals gefundene azimutale Spin-Asymmetrie positiver Pionen bezüglich der Lepton-Streuebene.

### Das HERA-B Experiment

Ziel des HERA-B Experiments ist die Untersuchung von Teilchen, die Charm- und Bottom-Quarks enthalten. Zentrales Ziel ist die Messung der CP-Asymmetrie bei B-Zerfällen. Weitere Fragestellungen sind Oszillationen zwischen  $B_s$ -Mesonen und ihren Antiteilchen, seltene Zerfälle schwerer Quarks sowie das Studium der QCD mit Hilfe der hadronischen Erzeugung schwerer Quarks. Wegen des großen physikalischen Interesses an der CP-Asymmetrie werden an extra dazu gebauten Elektron-Proton-Speicherringen am SLAC (USA) und bei KEK (Japan) komplementäre Messungen durchgeführt.

Bei Wechselwirkungsraten von 40 MHz sind die Anforderungen an das Experiment außergewöhnlich und bisher unerreicht. Bezogen auf diese Wechselwirkungsrate muss für den Zerfallskanal, in dem die CP-Asymmetrie gemessen werden soll, ein Unterdrückungsfaktor von  $10^{12}$  erreicht werden. Im Jahr 1999 hat das HERA-B-Experiment auf praktisch allen kritischen Gebieten entscheidende Durchbrüche erreicht: Langzeitbetrieb des Targets, weitgehende Fertigstellung und Inbetriebnahme der inneren und äußeren Spurkammern, Erprobung des Datennahmesystems, verschiedene Tests des Triggers und der Datenanalyse. Auch wenn noch weiterhin große Fortschritte im Einlaufen des Detektors und Triggers erzielt werden müssen, erscheint es möglich, dass bereits mit den Daten, die noch vor der HERA-Betriebsunterbrechung 2000 genommen werden, wichtige physikalische Ergebnisse erzielt werden können.

### Forschung an Lepton Collidern

Im Rahmen der seit Frühjahr 1998 durchgeführten ECFA-DESY-Studie werden die physikalischen Fragestellungen, die mit TESLA beantwortet werden können, untersucht und erste Ideen für einen

TESLA-Detektor ausgearbeitet. Die von den Maschinenphysikern aufgezeigte Erhöhung der Luminosität erlaubt eine eindrucksvolle Erweiterung des TESLA-Physikprogramms. An der Studie nehmen zahlreiche Wissenschaftler aus vielen europäischen und außereuropäischen Ländern teil.

Aus den Untersuchungen ergibt sich, dass auch nach der Entdeckung der Higgs-Bosonen an einem Hadron-Collider ein Linearcollider wie TESLA notwendig sein wird, um durch präzise Messungen der Higgs-Eigenschaften die Frage nach dem Ursprung der Teilchenmassen zu beantworten. Dies gilt auch für die Frage nach der Vereinheitlichung der starken mit der elektroschwachen Kraft, wo zum Beispiel das von vielen Physikern als sehr attraktiv angesehene Konzept der Supersymmetrie mit ausreichender Präzision untersucht werden kann.

Die Detektorstudien haben zu einem wesentlich verbesserten Verständnis des Untergrundes von niederenergetischen Photonen und Elektron-Positron-Paaren von Strahl-Strahl-Wechselwirkungen und der Granularität und Messgenauigkeit des Detektors geführt, die für die Beantwortung der physikalischen Fragestellungen notwendig sind. Für die einzelnen Detektorkomponenten, wie Abschirmmasken, Vertexdetektor, Zentraldetektor, Magnetspule, Kalorimeter, Myon-Detektoren und Triggersystem, liegen inzwischen Konzepte vor. Mit kleineren Vorversuchen für einzelne Detektorkomponenten, wie zum Beispiel einer Time Projection Chamber (TPC), wurde in Hamburg begonnen.

In kleineren Studien werden physikalische Fragestellungen für die Optionen TESLA in Kombination mit HERA (Elektron-Proton-Wechselwirkungen) und TESLA mit Kollisionen an Kernen (Wechselwirkungen polarisierter Elektronen mit polarisierten bzw. unpolarisierten Kernen) untersucht.

## 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, Flavor-Physik der schweren

Quarks und Neutrinos, Higgs-Mechanismus, Gravitation, Kosmologie, Stringtheorie, Gittereichtheorie und mathematische Physik.

Auf dem Gebiet der QCD wurden Fortschritte im Verständnis der für die HERA-Physik wichtigen Gebiete der Proton-Strukturfunktion und der diffraktiven Streuung erzielt. Auch die theoretischen und phänomenologischen Untersuchungen zu QCD-Instantonen wurden soweit fortgeführt, dass mit experimentellen Suchen bei H1 und ZEUS begonnen werden konnte.

In Hinblick auf Experimente am TESLA-Elektron-Positron-Collider wurden die präzise Massenbestimmung der Top-Quarks bei Paarerzeugung nahe der Schwelle, der Higgs-Mechanismus zur Erzeugung von Teilchenmassen und supersymmetrische Erweiterungen des Standard-Modells untersucht. Außerdem konnte für den Fall, dass der Higgs-Mechanismus in der Natur nicht realisiert sein sollte, gezeigt werden, dass W-Bosonen bei Energien von etwa 1 TeV stark wechselwirken. Dies kann an TeV-Elektron-Positron-Collidern getestet werden. Für Charginos, die supersymmetrischen Partner der W-Bosonen und der geladenen Higgs-Bosonen, wurde nachgewiesen, dass durch Messungen mit polarisierten Elektronen und Positronen die Fundamentalparameter des Chargino-Sektors experimentell vollständig rekonstruiert werden können.

Das starke Interesse an den experimentellen Hinweisen auf endliche Neutrino-Massen und Mischungen und am experimentellen Programm zum Nachweis der CP-Verletzung bei B-Mesonen hat zu einer Reihe theoretischer Untersuchungen auf dem Gebiet der Flavor-Physik geführt. Der Zusammenhang zwischen der Mischung im Lepton- und im Quark-Sektor wurde im Rahmen vereinheitlichter Theorien untersucht. Für supersymmetrische Theorien wurde unter anderem eine Wahrscheinlichkeit für den radiativen Zerfall des Myons in ein Elektron vorhergesagt, der in den nächsten Jahren experimentell überprüft werden kann. Ein weiterer Schwerpunkt der Theoriegruppe sind methodische Untersuchungen zu Quantenfeldtheorien in gekrümmten Räumen und das Studium von Stringtheorien.

Die Gittereichtheorie bietet einen Zugang zur Lösung von vielen Problemen, die im Rahmen der Störungstheorie nicht behandelt werden können. Schwerpunkte waren Untersuchungen zu chiralen Symmetrien in Eichfeldtheorien und Aspekte möglicher Theorien jenseits

des Standard-Modells. Außerdem wurden neue Algorithmen für die numerische Simulation fermionischer Quantenfeldtheorien entwickelt.

## Experimente mit Synchrotronstrahlung

Für die Forschung mit Synchrotronstrahlung bei DESY wurden im Jahr 1999 am Speicherring DORIS 5500 Betriebsstunden dediziert und bei PETRA etwa 1800 Stunden zur parasitären Nutzung bereitgestellt. Mehr als 2100 Wissenschaftler und Ingenieure kamen für eine oder mehrere Messzeiten zu HASYLAB, davon führten über 500 Wissenschaftler Arbeiten zu biologischen Fragestellungen an den Instrumenten der EMBL Außenstation durch. Die Ergebnisse sind im HASYLAB Jahresbericht zusammengefasst, der über Internet zugänglich ist. In den vergangenen Jahren wurde es Wissenschaftlern aus dem europäischen Ausland mit Hilfe der Europäischen Kommission ermöglicht, Experimente bei HASYLAB durchzuführen. HASYLAB hat auch für die nächste Förderperiode entsprechende Mittel erhalten.

Im Berichtsjahr wurden wichtige Entscheidungen zu den mittel- und langfristigen Perspektiven der Forschung mit Synchrotronstrahlung bei DESY getroffen. Das langfristige Ziel besteht in Bau und Betrieb einer Röntgenlaser-Anlage als Teil des TESLA-Projektes. Der in Bau befindliche Freie-Elektronen-Laser (FEL) für den Spektralbereich des Vakuum-Ultravioletten (VUV) und weichen Röntgenlichtes ist zum einen als integrierter Systemtest für TESLA zu sehen, zum anderen eröffnet er neue, bislang einmalige Möglichkeiten zum Studium von Atomen, Molekülen, Clustern und von kondensierter Materie auf der Zeitskala von 400 Femtosekunden. Für diese Arbeiten ist eine enge Kooperation mit Laserexperten notwendig, und deshalb kommt der Entscheidung der Universität Hamburg, wonach das Laserinstitut aus der Innenstadt auf den DESY-Campus umzieht, besondere Bedeutung zu. Ein zusammen mit der GKSS eingereichtes HGF Strategiefonds-Projekt zur Realisierung der „Seeding Option“ am VUV FEL wurde bewilligt. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Einrichtung wird die erzeugte Laserstrahlung auch auf der Zeitachse kohärent. Innerhalb des fünften Rahmenprogramms der Europäischen

Kommission wurde ein Projekt zum Aufbau der Infrastruktur für „pump&probe“ Experimente am VUV FEL genehmigt.

1999 wurden die Voraussetzungen für den Aufbau einer neuen Arbeitsgruppe für Strukturbiologie geschaffen. In diesem Zusammenhang ist auch die Entscheidung zu sehen, dass DESY während des Baus von TESLA und der Inbetriebnahme der Anlage Synchrotronstrahlung von Speicherringen zur Verfügung stellen wird. Es wurde eine Arbeitsgruppe eingerichtet, die Möglichkeiten zur Verbesserung der Emittanz des DORIS-Speicherrings untersucht unter der Randbedingung, dass zumindest die jetzigen Wiggler-Strahlführungen erhalten bleiben. Eine zweite Arbeitsgruppe studiert weitere Möglichkeiten für die Forschung mit Synchrotronstrahlung am PETRA-Speicherring.

## TESLA Test Facility

Zur TESLA Test Facility (TTF) hat die FDET Gruppe maßgeblich beigetragen. Schwerpunkte waren der Betrieb der TTF, die Entwicklung und Erprobung neuer Methoden zur Strahldiagnose, die vor allem für den FEL (Freie-Elektronen-Laser) wesentlich sind, und die Mitarbeit am Entwicklungsprogramm zur Erhöhung der Beschleunigungsgradienten in supraleitenden Niob-Resonatoren. Mehr Information findet man im Abschnitt M-Bereich dieses Jahresberichts.

## Technische Entwicklungsgruppen

Die Technischen Entwicklungsgruppen unterstützen die Experimente bei HASYLAB und der Teilchenphysik auf den Gebieten digitale und analoge Signalverarbeitung, Opto- und Mikroelektronik, spezielle Programmentwicklungen, Reparaturservice für Elektronik und Rechner, Wartung von Detektorkomponenten, Bestückung- und Bond-Dienstleistungen, und die Betreuung der Videokonferenz-Anlagen. Außerdem werden eigenständige Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Beispiele sind ein verteiltes Transienten-Rekorder-System für Beschleuniger und ein Multizellen-Silizium-Driftkammerdetektor-System für die Holographie mit Röntgenstrahlen bei HASYLAB.

## Bibliothek und Dokumentation

Die Gruppe sammelt die von den DESY-Mitarbeitern benötigte Fachliteratur und verwaltet den Druck der am DESY erstellten wissenschaftlichen Veröffentlichungen (1999 sind dies 201 DESY-Berichte, 6 Diplom- und 40 Doktorarbeiten, 3 Konferenzabhandlungen und 133 Manuskripte in Fachzeitschriften). In enger Zusammenarbeit mit der Bibliothek des SLAC wird die gesamte Literatur der Hochenergiephysik dokumentarisch bearbeitet, in der Datenbank HEP aktualisiert und im 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 und Titel und Kurzfassungen von Publikationen in ausgewählten Zeitschriften.

## 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 (11 000 Besucher im Jahr 1999) 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 ak-

tiven Teilnahme aller DESY-Bereiche kann die relativ kleine PR-Gruppe dieses weit gefächerte Programm durchführen.

Ein besonderer Arbeitsschwerpunkt der PR-Gruppe ist die Vorbereitung der Ausstellung „Licht der Zukunft“, die im Rahmen der Weltausstellung EXPO-2000 vom 1. Juni bis 31. Oktober täglich am DESY-Gelände stattfinden wird.

## Konferenzen und Workshops

Wie in jedem Jahr fanden in Hamburg und Zeuthen eine Reihe von Festveranstaltungen, Tagungen und Workshops statt.

Besonders hervorzuheben sind

– das Gedenkkolloquium am 7. Juli für Bjørn H. Wiik

und die folgenden Tagungen:

- DIS-99, International Workshop on Deep Inelastic Scattering and QCD, 19–23 April 1999, Zeuthen;
- Workshop on Polarized Protons at High Energies, 17–20 May 1999, Hamburg;
- Workshop on Physics with HERA as eA Collider, 25–26 May 1999, Hamburg;
- 21st International Conference on Free Electron Lasers and 6th FEL Application Workshop, 23–28 Aug 1999, Hamburg;
- $\nu$ -EWS from the Universe, 29 Sep–1 Oct 1999, Hamburg.

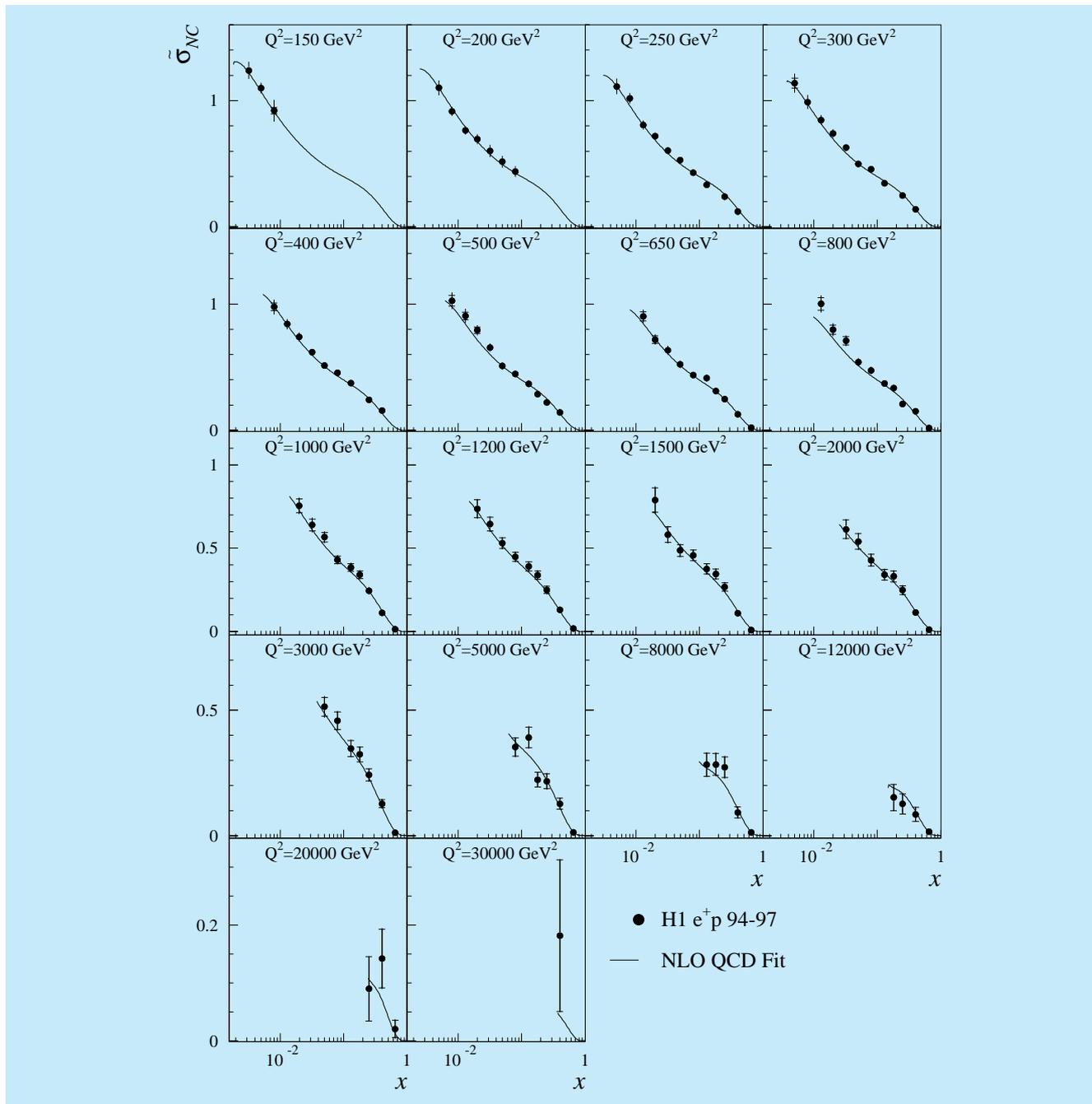


Abbildung 2: Reduzierter Wirkungsquerschnitt für den inklusiven NC-Streuprozess ( $e^+p \rightarrow e^+X$ ) als Funktion des Impulsanteils  $x$  des gestreuten Quarks für verschiedene Werte  $Q^2$  der Virtualität des ausgetauschten Bosons, verglichen mit einem auf QCD und der elektroschwachen Theorie beruhenden Fit. Der Anstieg des Wirkungsquerschnitts zu kleinen Werten von  $x$  wird durch eine stark ansteigende Dichte der Partonen (Quarks und Gluonen) im Proton interpretiert.

# 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, Slovak 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:** J. Dainton, Univ. of Liverpool und DESY (bis August 1999); E. Elsen, DESY (ab August 1999)

Das Berichtsjahr war geprägt durch eine sehr lange Periode der Datennahme. Der Luminositätsbetrieb von HERA begann schon im Januar 1999 und endete nach einigen kürzeren Unterbrechungen im Dezember 1999. Das H1-Experiment konnte im  $e^-p$ -Betrieb eine für die Physikanalyse nutzbare Luminosität von  $14 \text{ pb}^{-1}$  und im  $e^+p$ -Betrieb von  $21 \text{ pb}^{-1}$  akkumulieren. Der Detektor arbeitete während der langen Zeit sehr zufriedenstellend mit Ausnahme der Spurdetektoren, die durch zwei Drahtbrüche im zentralen Detektor und durch den Ausfall der Kühlung des Vorwärtsdetektors im letzten Drittel der Luminositätsperiode reduzierte Effizienzen aufwiesen. Im Berichtsjahr wurde intensiv an den Vorbereitungen des für das Jahr 2000 vorgesehenen größeren Detektorumbaus gearbeitet, der es erlauben wird, im Zuge des Programms zur Erhöhung der Luminosität von HERA die Messgenauigkeiten erheblich zu verbessern.

Im Berichtsjahr hat die H1-Kollaboration acht wissenschaftliche Arbeiten publiziert, die überwiegend auf der großen, in den Jahren 1994–1997 im  $e^+p$ -Betrieb akkumulierten Luminosität basieren. In diesem Bericht kann nicht auf alle Arbeiten eingegangen werden.

Es wurde eine umfangreiche Publikation zur tief-unelastischen inklusiven Positron-Proton-Streuung für hohe Werte  $Q^2$  des Quadrates des Viererimpul-

ses des bei der Streuung ausgetauschten Eichbosons erarbeitet. Die Analyse umfasst sowohl die Prozesse des Neutralen Stromes (NC) ( $e^+p \rightarrow e^+X$ ) als auch die des geladenen Stromes (CC) ( $e^+p \rightarrow \bar{\nu}_e X$ ). Die Daten erlauben sowohl Tests des Standard-Modells in Bezug auf die Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung in einem Bereich, wo die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung vergleichbar stark werden, als auch die Untersuchung der inneren Struktur des Protons. Die Variation der Wirkungsquerschnitte für beide Prozesse über den großen erfassten Bereich der SkalenvARIABLEN  $Q^2$  und  $x$  kann im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) und der elektroschwachen Theorie sehr gut beschrieben werden (siehe Abb. 2 für den NC-Prozess). Die gute Übereinstimmung der Messungen mit dem Standard-Modell erlaubte es, Grenzen auf die Produktionsraten exotischer Teilchen wie Leptoquarks zu setzen.

Mehrere Arbeiten befassen sich mit Untersuchungen des hadronischen Endzustandes der tiefunelastischen Positron-Proton-Streuung. Messungen des Energieflusses und der Eigenschaften der produzierten Jets erlaubten detaillierte Vergleiche mit Vorhersagen der QCD.

Studien zur QCD wurden auch in exklusiven und semi-inklusive Prozessen durchgeführt. So erlaubte die Untersuchung der Produktion von vorwärts

gestreuten neutralen Pionen Tests der Parton-Dynamik im Bereich sehr kleiner Anteile des Partons am Gesamtimpuls des Protons. Die Produktion schwerer Quarks ist im Rahmen von Untersuchungen zur QCD besonders interessant, da bereits die hohen Massen von charm- oder bottom-Quarks eine hohe Energieskala setzen. Es wurde in diesem Zusammenhang sowohl die exklusive Produktion von  $J/\psi$ -Mesonen studiert, als auch der inklusive Wirkungsquerschnitt für bottom-Produktion bestimmt.

## Datennahme und Detektor

### Datennahme

Das Berichtsjahr war geprägt durch eine sehr lange Periode des HERA-Luminositätsbetriebes. Nach einer kurzen Betriebspause 1998/99, die zu kleineren Reparaturen und Optimierungen am H1-Detektor genutzt wurde, lief der  $e^-p$ -Luminositätsbetrieb schon im Januar 1999 wieder an. Bis zum Ende des  $e^-p$ -Betriebes im April 1999 konnte eine nutzbare Luminosität von  $14 \text{ pb}^{-1}$  im H1-Detektor aufgenommen werden, dies ist um einen Faktor drei höher als im  $e^-p$ -Betrieb 1998. Im Vergleich zu den sehr schwierigen Datennahmebedingungen von 1998 war in diesem Jahr der Strahluntergrund geringer, so dass auch die empfindlichen Spurdetektoren mit hoher Effizienz betrieben werden konnten.

Nach einer kurzen Unterbrechung im Mai/Juni konnte Anfang Juli der Luminositätsbetrieb, nun mit Positronen, wieder aufgenommen werden. Es zeigte sich, daß im  $e^+p$ -Betrieb, wie schon in früheren Jahren erfahren, gegenüber dem  $e^-p$ -Betrieb verbesserte Untergrundbedingungen herrschten. Die gute Datennahme-Effizienz ergab in Verbindung mit der langen Messzeit bis Mitte Dezember eine nutzbare Luminosität von  $21 \text{ pb}^{-1}$ . Dies erhöhte die totale bisher von H1 im  $e^+p$ -Betrieb akkumulierte Luminosität um mehr als 50% auf  $\sim 60 \text{ pb}^{-1}$ .

### Spurdetektoren

Das insgesamt sehr positive Bild der Datennahme wurde durch im Berichtsjahr auftretende Probleme mit

den inneren Spurkammern getrübt. Nachdem während der Betriebsunterbrechung im Mai/Juni ein in der zentralen Jetkammer (CJC) gerissener Draht erfolgreich entfernt werden konnte, war dieser Detektor wieder voll effizient. Leider traten dann im September und Oktober erneut zwei Drahtbrüche auf, was zu einer Verschlechterung der CJC-Effizienz auf 87% führte. In der Weihnachtspause 1999/2000 konnten die beiden gerissenen Drähte erfolgreich aus der CJC entfernt werden. Im Oktober trat auch im Bereich der Vorwärtsspurkammern ein Problem auf. Die Kühlung dieses Detektor-teils konnte aufgrund eines Wasserlecks nicht aufrecht erhalten werden. Die Konsequenz war, dass zur Reduzierung der Wärmeentwicklung die Verstärker der radialen Spurkammern ausgeschaltet werden mussten und sich somit die Anzahl der verfügbaren Messpunkte entlang einer Spur verringerte. Trotz dieser Einschränkung lassen sich Spuren in Vorwärtsrichtung mit etwas reduzierter Effizienz rekonstruieren.

### VLQ-Detektor

Das zum Nachweis von sehr kleinen Elektronstreuungswinkeln ( $\Theta_e \geq 15 \text{ mrad}$ ) eingebaute doppelarmige VLQ-(Very-Low- $Q^2$ -)Spektrometer wurde im Berichtsjahr in Betrieb genommen. Das VLQ-Spektrometer ist aus Wolfram-Szintillator-Kalorimetern und Halbleiter-Spurdetektoren aufgebaut. Es gelang, die Energieschwelle der Kalorimeter für den inklusiven Elektronen-Trigger zur Bestimmung der Proton-Strukturfunktion  $F_2$  aus der Reaktion  $ep \rightarrow eX$  auf 8 GeV zu reduzieren. Ein Koinzidenztrigger aus den Signalen beider Spektrometerarme erlaubt die Messung von Photon und Elektron aus dem QED-Compton Prozess  $ep \rightarrow e'\gamma p$ .

Zur Zeit wird an der Auswertung der mit dem VLQ aufgenommenen Daten gearbeitet. Die Energie-Eichung der Kalorimeter erfolgte mit Hilfe des „kinematischen Peaks“ der gestreuten Elektronen (Abb. 3a) sowie der Energiesumme  $E_{e'} + E_\gamma$  aus dem QED-Compton-Prozess, die die Elektronenstrahl-Energie ergeben muss (Abb. 3b). Die Positionseichung von Kalorimetern und Halbleiter-Spurdetektoren wurde mit Ereignissen aus dem QED-Compton Prozess erreicht. Wie aus der Residuenverteilung zum Beispiel der Vertikalkoordinaten

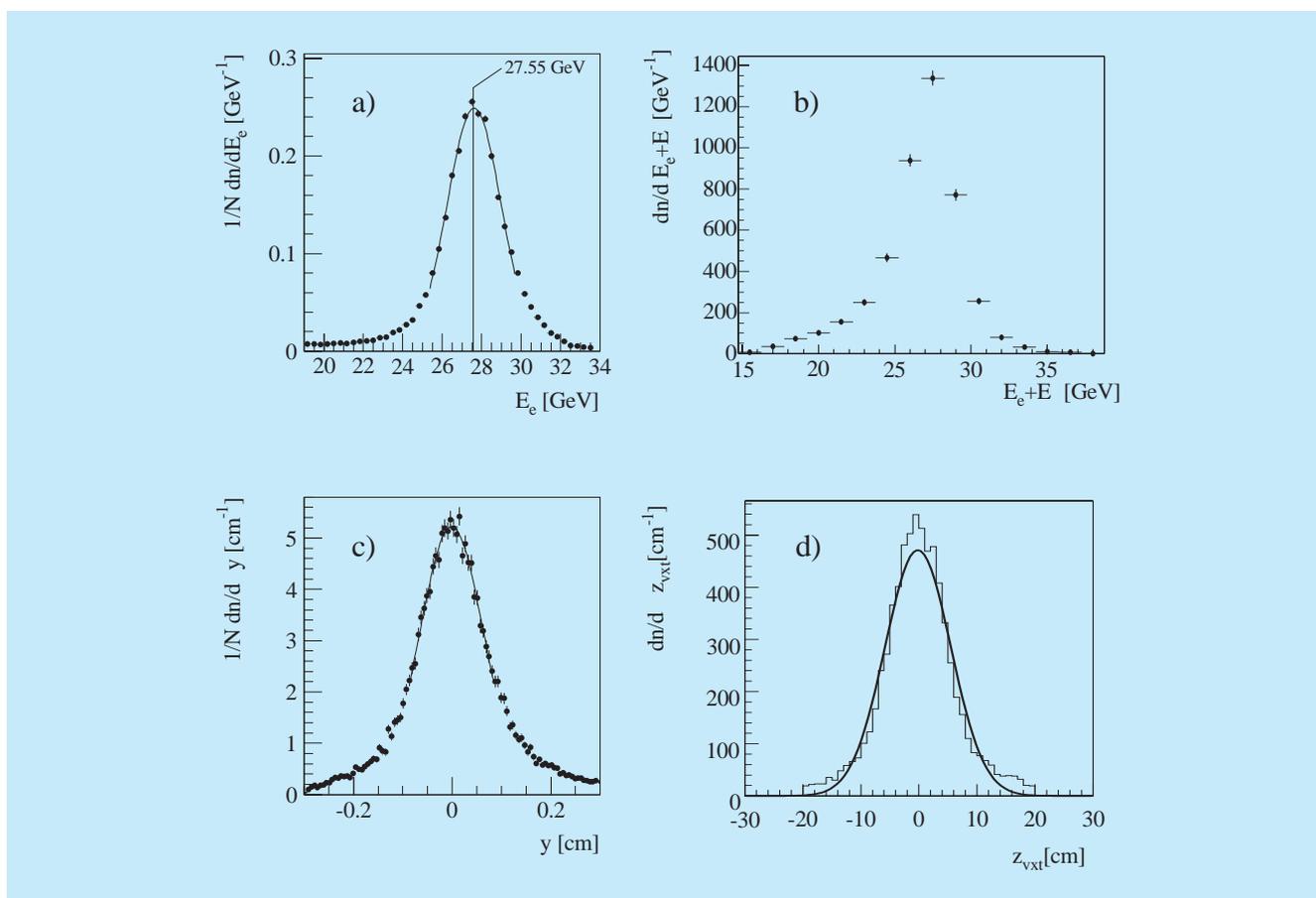


Abbildung 3: Erste Analyse-Resultate zur Kalibration der Energiemessung (a) (b) und der Ortsauflösung (c) (d) des VLQ-Spektrometers:

- (a) die Energie der gestreuten Positronen  $E_{e'}$  aus der Reaktion  $ep \rightarrow e' X$ ;
- (b) die Summe der Energien  $E_{e'} + E_{\gamma}$  aus der Reaktion  $ep \rightarrow e' \gamma p$ ;
- (c) die Differenz der  $y$ -Koordinaten gemessen mit dem Kalorimeter bzw. Spurdetektor;
- (d) die Differenz der  $z$ -Position des Ereignisvertex gemessen mit dem VLQ bzw. dem zentralen Spurdetektor.

von Kalorimetern und Spurdetektoren (Abb. 3c) hervorgeht, liegt die Ortsauflösung der Kalorimeter bei etwa 0.5 mm. Die Ortsauflösung der Spurdetektoren beträgt etwa 15  $\mu\text{m}$ . Sie ermöglicht bei Elektronen-Streuwinkeln um 20 mrad die Bestimmung der  $z$ -Koordinate des primären  $ep$ -Reaktionsvertex entlang dem Strahl mit einer Präzision von etwa 6 cm (Abb. 3d). Die Daten des VLQ-Spektrometers werden es erlauben, die Strukturfunktion des Protons bei  $Q^2$ - und  $x$ -Werten bis hinunter zu  $Q^2 \sim 0.04 \text{ GeV}^2$  bzw.  $x \sim 10^{-6}$  zu bestimmen.

## Vorwärts-Proton-Spektrometer

Zur Untersuchung von Reaktionen mit einem energiereichen Proton in Vorwärtsrichtung wird dieses bei H1 im Vorwärts-Proton-Spektrometer (FPS) nachgewiesen. Im Berichtsjahr wurden zum ersten Mal während einer längeren Periode Daten mit dem horizontalen FPS-Detektorpaar bei 63 m und 80 m aufgezeichnet. Hier werden diffraktive Reaktionen erfasst, bei denen das Strahl-Proton weniger als 5% seiner Energie

verloren hat. Der Betrieb der beiden Stationen wurde durch hohen Untergrund erschwert. Dieser wurde einerseits durch Teilchen verursacht, welche die eigentlichen Strahlpakete verlassen haben und auf quasistabilen Bahnen weit außerhalb der Sollbahn umlaufen. Andererseits erhöhten Strahlaufweitungen durch den Betrieb der HERA-B-Targetdrähte den Untergrund und führten zu häufigen Unterbrechungen der Datennahme.

Die Physikanalyse der neuen FPS-Daten konzentriert sich zuerst auf Prozesse, die eine hohe Rate haben, wie die elastische Photoproduktion von  $\rho$ -Mesonen ( $\gamma p \rightarrow \rho p$ ). In Koinzidenz zu einem im FPS nachgewiesenen Proton beobachtet man im zentralen H1-Detektor  $\rho$ -Mesonen, welche durch den Zerfall in zwei geladene Pionen nachgewiesen werden. Die elastische Photoproduktion von  $\rho$ -Mesonen erlaubt es, die Polarisation der  $\rho$ -Mesonen zu studieren und verschiedene Helizitäts-Amplituden der Reaktion zu bestimmen. Dies ermöglicht es, zu untersuchen, wie der Spin der Photons auf das  $\rho$ -Meson übertragen wird. Ferner ist die elastische Photoproduktion von  $\rho$ -Mesonen dazu geeignet, die Energieeichung des Vorwärts-Proton-Spektrometers zu überprüfen, da die Energie des gestreuten Protons aus den Messgrößen im Zentraldetektor rekonstruiert werden kann.

## Detektorausbau für HERA2000

Für das Jahr 2000 ist ein Umbau der strahlführenden Magnete im Bereich der Wechselwirkungszonen von HERA geplant mit dem Ziel, eine Erhöhung der Luminosität für Elektron- (oder Positron-)Proton Kollisionen um einen Faktor fünf zu erreichen. Dies erfordert den Einbau zweier langer, dünner, supraleitender Magnete innerhalb des H1-Experiments. Die Planungen für die Montage und Justierung dieser Magnete sind im Jahre 1999 weitgehend abgeschlossen worden, und die Herstellung der einzelnen Komponenten hat begonnen.

Die geänderte Strahlführung erfordert ein neues zentrales Vakuumrohr, das zur Minimierung von Vielfachstreuung auf einer Länge von 1 m aus einer Beryllium-Aluminiumlegierung (Dicke 1.1% einer Strahlungslänge) hergestellt wird und einen elliptischen Querschnitt haben wird. Die vom Elektronen-Strahl in der Maschinenebene emittierte Synchrotronstrahlung darf

das Strahlrohr nicht im Bereich der Spurdetektoren treffen und wird außerhalb des Experiments absorbiert. Die in das Experiment zurückgestreute Synchrotronstrahlung wird von einer aufwendigen Anordnung von Kollimatoren absorbiert.

In der Vertikalen kann mit den Spurdetektoren sehr viel dichter an den Strahl herangegangen werden, was die Messgenauigkeit für die Zerfälle von Hadronen mit charm und bottom verbessert. Die Grenze wird hier von der Größe des Protonen-Strahls bei der Injektion und von der Stabilität des Vakuumrohres selbst gesetzt und hat zu der Wahl eines Strahlrohrquerschnittes von  $123 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  geführt. Der Kollisionspunkt ist dabei gegenüber dem Mittelpunkt des Strahlrohres im Elektronen-Betrieb um 21.5 mm und im Positronen-Betrieb um 29.5 mm horizontal in Richtung des HERA-Ringzentrums verschoben, um zu vermeiden, dass das Strahlrohr von Synchrotronstrahlung getroffen wird. Das elliptische, exzentrische Strahlrohr hat Konsequenzen für die innersten Detektorkomponenten von H1.

Der zentrale H1-Vertexdetektor wird unter Wiederverwendung der Siliziumdetektoren an die elliptische Geometrie angepasst. Allerdings sind bei den integrierten CMOS-Schaltkreisen für die Signalverstärkung, Zwischenspeicherung und serielle Auslese 1998/99 während des HERA-Betriebs mit Elektronen Strahlenschäden aufgetreten. Es ist daher die Umstellung auf eine strahlenbeständigere Elektronik vorgesehen, in einer Technologie, wie sie für die LHC-Experimente am CERN (Genf) entwickelt worden ist.

Zusätzlich zum vorhandenen, aber zu modifizierenden, rückwärtigen wird ein vorwärtiger Siliziumdetektor gebaut. Beide werden aus jeweils fünf Doppellagen für die zweidimensionale Koordinatenbestimmung geladener Teilchen bestehen. Die Produktion der Siliziumdetektoren läuft mit sehr guter Qualität, und die Herstellung der mechanischen Kohlefaserkonstruktion hat begonnen. Alle drei Siliziumdetektoren zusammen werden 235 520 Auslesekanäle umfassen.

Für die neue zentrale Vieldraht-Proportionalkammer wurde ein Prototyp gebaut und erfolgreich getestet. Der Bau der fünfteiligen Kammer hat begonnen. Sie dient in der ersten Triggerstufe zur Bestimmung der Koordinate des Wechselwirkungspunktes entlang der Strahlachse. Es müssen die Signale von 9600 Elektroden alle 96 ns,

dem zeitlichen Abstand der ep-Kollisionen, an die Entscheidungselektronik übertragen werden. Dazu wurde eine elektro-optische Übertragungskette mit einer Datenrate von 832 Mbit/s entwickelt und erfolgreich getestet.

Die höhere Ereignisrate durch die erhöhte Luminosität erfordert die Erweiterung des Triggersystems von H1. Insbesondere soll die Erzeugung schwerer Quarks bereits nach wenigen hundert Mikrosekunden erkannt werden. Dazu wird ein Teil der Signale der zentralen Spurkammer (CJC) mit einem dreistufigen System schneller Logikbausteine und Prozessoren verarbeitet und verknüpft. Es soll die Spuren geladener Teilchen finden, die Spurparameter bestimmen und die invariante Masse für Spurkombinationen berechnen, wodurch Ereignisse mit schweren Quarks ausgewählt werden können.

Für den Vorwärts-Spurdetektor werden fünf neue planare Driftkammern (parallele Drähte senkrecht zur Strahlrichtung) mit jeweils acht Drahtlagen gebaut. Dieser Kammertyp hat sich im Vergleich zu den radialen Driftkammern als robuster im Betrieb bei HERA erwiesen. Die neuen Kammern ergänzen die vorhandenen neun planaren Kammern mit zwei zusätzlichen Projektionen und ermöglichen eine verbesserte Identifikation der Spuren geladener Teilchen, insbesondere in Verbindung mit dem neuen vorwärtigen Siliziumdetektor.

Die bestehende rückwärtige Driftkammer hat einen Innendurchmesser von 120 mm und passt damit nicht mehr auf das neue elliptische Strahlrohr. Als Ersatz wurde der Bau einer sechslagigen Vieldrahtproportionalnalkammer begonnen, die den Durchgangspunkt gestreuter Elektronen bestimmen soll. Für die Auslese der 5200 Drähte ist die integrierte Elektronik, wie sie für die Siliziumdetektoren von H1 entwickelt worden ist, vorgesehen.

Für die Messung der Luminosität ist ein neues Kalorimeter mit strahlenbeständigen Glasfasern und Absorberplatten aus Wolfram gebaut worden. Das in den Fasern von relativistischen Elektronen und Positronen erzeugte Čerenkovlicht wird mit Photoelektronen-Vervielfachern nachgewiesen. Der Detektor hat den Vorteil, unempfindlich für Synchrotronstrahlung zu sein. Das Kalorimeter ist bereits in einem Teststrahl am CERN (Genf) kalibriert worden, wobei die erwartete Energieauflösung von  $21\%/\sqrt{E}$  erreicht wurde. Die

Elektronik zur schnellen und genauen Bestimmung der Luminosität ist in Produktion.

Das FPS erhält neue Detektoren aus verbesserten szintillierenden Fasern, die auch strahlungsresistenter sind als die alten. Bei diesem Umbau wird auch die geometrische Anordnung der Fasern geändert, um eine größere Ansprechwahrscheinlichkeit zu erreichen.

## Physikalische Ergebnisse

Im Folgenden werden einige der im Berichtsjahr veröffentlichten Analysen etwas näher erläutert.

### Tiefunelastische ep-Streuung

Im Berichtsjahr wurde eine umfangreiche Veröffentlichung zur tiefunelastischen  $e^+p$ -Streuung bei hohen Impulsüberträgen ( $Q^2 > 150 \text{ GeV}^2$ ) erarbeitet, die alle bis Ende 1997 erfassten Daten, entsprechend einer Luminosität von  $37 \text{ pb}^{-1}$ , berücksichtigt.

Einige Teilaspekte der Resultate wurden bereits im Jahresbericht 1998 beschrieben. In tiefunelastischer Streuung wechselwirkt das Positron mit einem Konstituenten (Quark) des Protons unter Austausch eines Eichbosons der elektroschwachen Wechselwirkung.

Streuwirkungsquerschnitte wurden sowohl für neutrale Ströme (NC, Photon und Z-Boson Austausch) als auch für geladene Ströme (CC, W-Boson Austausch) gemessen. Die kinematischen Messgrößen sind dabei die Virtualität  $Q^2$  des ausgetauschten Eichbosons und der relative Impulsanteil  $x$  des Quarks am Gesamtimpuls der Protons. Der Photon-Austausch dominiert die NC-Prozesse, nur bei hohen Werten von  $Q^2$  trägt auch der  $Z^0$ -Austausch signifikant bei.

Abbildung 2 zeigt den um kinematische Vorfaktoren reduzierten NC-Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $x$  für verschiedene Werte von  $Q^2$ , dabei ist  $1/\sqrt{Q^2}$  ein Maß für die Auflösung, mit der die Struktur des Protons untersucht wird. Das höchste erreichte  $Q^2$  entspricht einer Auflösung von  $10^{-16} \text{ cm}$ , das heißt einem Tausendstel des Proton-Radius. Wie schon in den frühen HERA-Resultaten bei kleinen Werten von  $Q^2$  gesehen, steigt auch in den jetzt zugänglichen Bereichen von ho-

hen  $Q^2$  der Wirkungsquerschnitt zu kleinen Werten von  $x$  stark an. Dieses wird durch eine zu kleinen  $x$  stark ansteigende Parton-Dichte erklärt.

Im Rahmen der Theorie der Quantenchromodynamik (QCD) wird versucht, den Aufbau des Protons aus Quarks und Gluonen quantitativ zu verstehen. Obwohl es bisher nicht möglich ist, die  $x$ -Verteilung bei festem  $Q^2$  theoretisch zu berechnen, wird dennoch die Variation mit  $Q^2$  durch die QCD vorhergesagt. Die in Abbildung 2 eingezeichneten Kurven zeigen, dass der Verlauf des Wirkungsquerschnitts über den gesamten Bereich von  $x$  und  $Q^2$  sehr gut im Rahmen der QCD und der elektroschwachen Theorie verstanden werden kann.

Im Gegensatz zu NC-Prozessen, in denen das Photon oder Z-Boson an alle Quarks koppelt, werden in der

CC-Streuung nur bestimmte Quark-Sorten selektiert. Im Falle der  $e^+p$ -Streuung kann das ausgetauschte  $W^+$ -Boson nur an negativ geladene Quarks, das heißt an d-Quarks oder an See-Quarks ( $\bar{u}, \bar{c}, s$ ) koppeln. Abbildung 4 zeigt den reduzierten CC-Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $x$  für verschiedene Werte von  $Q^2$ . Die gute Übereinstimmung mit der in der Abbildung dargestellten QCD-Anpassung zeigt, dass sich auch die Kopplung des W-Bosons an die Quarks wie im Standard-Modell erwartet verhält. Bei hohen Werten von  $x$  dominiert der Beitrag der d-Quarks. Zusätzlich zur Sensitivität auf die Quark-Sorte ist die CC-Wechselwirkung auch auf die Helizität (Ausrichtung des Quark-Spins) sensitiv. Für Positronen führt die Streuung an Quarks zum Gesamtspin 1 des Positron-Quark-Systems, während die Streuung an Antiquarks zum Gesamtspin 0 führt. Ein Gesamtspin 0 führt zu einer flachen Verteilung in der Inelastizität  $y$ , während ein Gesamtspin von 1 zu einer  $(1 - y)^2$ -Verteilung

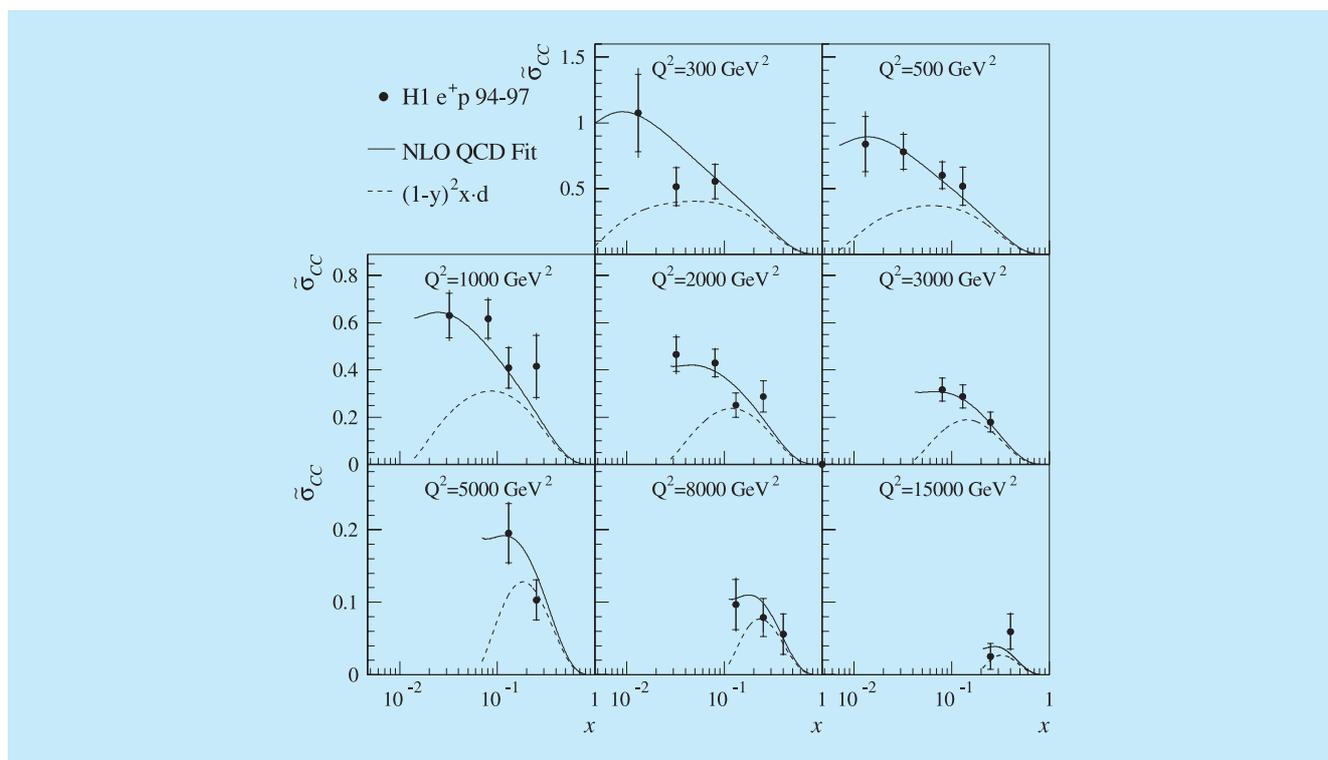


Abbildung 4: Reduzierter Wirkungsquerschnitt für den inklusiven CC-Streuprozess ( $e^+ p \rightarrow \bar{\nu}_e X$ ) als Funktion des Impulsanteils  $x$  des gestreuten Quarks für verschiedene Werte  $Q^2$  der Virtualität des ausgetauschten Bosons, verglichen mit einem auf QCD und der elektroschwachen Theorie beruhenden Fit. Die Wirkungsquerschnitte bei hohen  $x$  sind ein Maß für die Dichte der d-Quarks im Proton.

führt. Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Ereignisse als Funktion von  $y$  für verschiedene Werte von  $x$ . Für kleine  $x$  ( $x = 0.08$ ) misst man eine flache Verteilung, überlagert mit einer  $(1 - y)^2$ -Komponente. Dies ist der Bereich, wo neben dem d-Quark auch Antiquarks aus dem See signifikant zum Streuprozess beitragen. Für hohe  $x$  ( $x = 0.25$ ) ist der flache Anteil verschwunden, das heißt man streut nur noch am d-Quark. Die hier sichtbare Sensitivität auf die Quark-Struktur des Protons zeigt, dass es mit den nach 2000 erreichbaren hohen Luminositäten für  $e^+$ - und  $e^-$ -Streuung möglich sein wird, einzelne Quark- und Antiquark-Verteilungen quantitativ zu bestimmen.

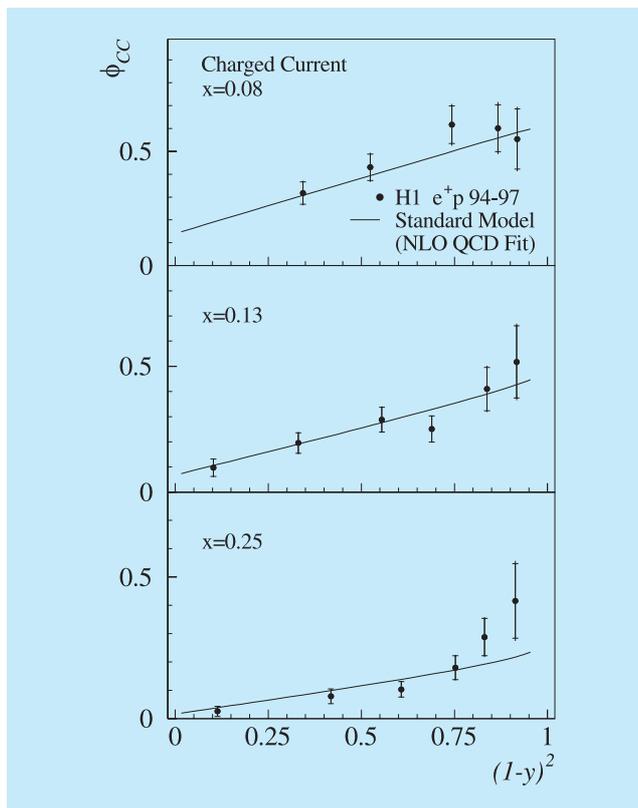


Abbildung 5: Verteilung der Ereignisse des inklusiven CC-Streuprozesses ( $e^+p \rightarrow \bar{\nu}_e X$ ) als Funktion des Inelastizitätsparameters  $y$  für drei Werte des Impulsanteils  $x$  des gestreuten Quarks, verglichen mit einem auf QCD und der elektroschwachen Theorie beruhenden Fit. Die Daten bestätigen die im Standard-Modell erwarteten Abhängigkeiten der CC-Streuung von der Art (Quark oder Antiquark) und der Helizität des wechselwirkenden Quarks.

Die Untersuchung tiefunelastischer Streuung bei höchsten  $Q^2$  eröffnet auch die Möglichkeit, in einem bisher unerforschten Energiebereich nach Physik jenseits des Standard-Modells zu suchen. Sollte es in der Natur sogenannte Leptoquarks (LQ) geben, wäre die  $e$ -Streuung bei HERA eine ideale Möglichkeit, diese zu produzieren, da im Anfangszustand ein Lepton (das Positron) und ein Quark (aus dem Proton) bei hoher Energie wechselwirken. Diese beiden Teilchen könnten zu einem Leptoquark definierter Masse fusionieren. Die Leptoquarks werden wieder in ein Quark und Lepton zerfallen. Für den Fall, dass die Zerfallsprodukte des Leptoquarks wieder Teilchen der ersten Generation ( $\nu_e, e, u, d$ ) sind, unterscheidet sich die Topologie einzelner Ereignisse nicht von der der tiefunelastischen NC- und CC-Ereignisse. Man erwartet jedoch Abweichungen in den Verteilungen der Ereignisse in Bezug auf die kinematischen Variablen  $x$  und  $y$ . Das Interesse an der Suche nach Leptoquarks erhöhte sich stark, als sich in den von der H1- und der ZEUS-Kollaboration bis Ende 1996 aufgenommenen Teildatensätzen ( $14 \text{ pb}^{-1}$  für H1) Abweichungen von den Vorhersagen des Standard-Modells in diesen Verteilungen abzeichneten.

Die H1-Kollaboration hat nun in den gesamten zur Verfügung stehenden Daten sowohl im NC- als auch im CC-Kanal nach Leptoquarks der ersten Generation gesucht. Aus der Tatsache, dass dabei keine statistisch signifikante Abweichung von der Standard-Modell-Erwartung mehr beobachtet werden konnte, wurden Grenzen auf die Produktion von Leptoquarks abgeleitet. Die Grenzen hängen von der Masse des Leptoquarks  $M_{LQ}$ , seinem Verzweungsverhältnis  $\beta$  für den Zerfall  $LQ \rightarrow e q$  und der Lepton-Quark Kopplung  $\lambda$  ab. Für zwei verschiedene  $\lambda$ -Werte ist in Abbildung 6 die mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% ausschließbare Region in der  $\beta$ - $M_{LQ}$  Ebene für den Fall der  $e^+d$ - und  $e^+u$ -Kopplung dargestellt. Die von der H1-Kollaboration ermittelten Ausschließungsbereiche gehen weiter als die am Tevatron (Batavia, USA) gemessenen. Es zeigt sich auch, dass für sehr kleine Werte von  $\beta$  Leptoquarks im HERA-Energiebereich nicht ausgeschlossen sind.

Die H1-Kollaboration hat die Suche auch auf solche Leptoquarks ausgedehnt, die Übergänge zur zweiten und dritten Fermion-Generation erlauben. Die Prozesse  $e^+q \rightarrow LQ \rightarrow \mu q$  und  $e^+q \rightarrow LQ \rightarrow \tau q$  führen zu Ereignissen ähnlich den NC-Ereignissen, aber statt des

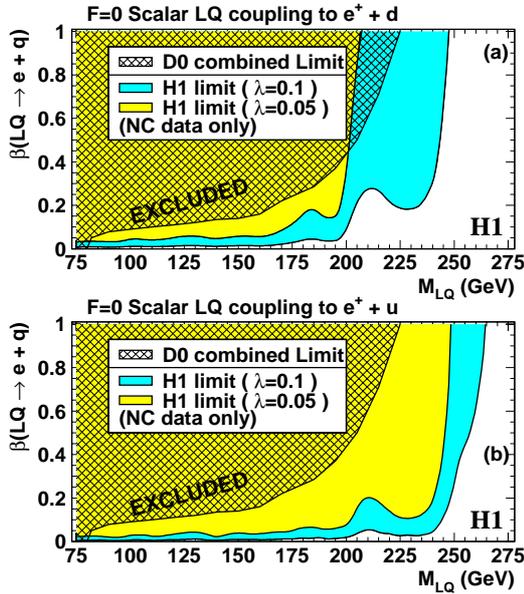


Abbildung 6: Massenabhängige Ausschließungsgrenzen (95% CL) auf das Verzweigungsverhältnis  $\beta(LQ \rightarrow eq)$  für skalare Leptoquarks, produziert in  $e^+d$ - oder  $e^+u$ -Fusion für zwei Werte des LQ-Kopplungsparameters  $\lambda$ . Der Wertebereich oberhalb der Kurven ist ausgeschlossen. Verglichen mit den am Tevatron (D0) erhaltenen Grenzen schließen die H1-Resultate einen größeren Parameterbereich in  $M_{LQ}$  und  $\beta$  aus, besonders für kleine Werte von  $\beta$ .

gestreuten Positrons wird ein Myon oder Tauon im Endzustand beobachtet. Es konnten im gesamten Datensatz keine Ereignisse gefunden werden, die mit den erwarteten Charakteristika der Produktion und des Zerfalls von Leptoquarks kompatibel waren. Insbesondere sind die im Jahresbericht 1998 (Seite 50) erwähnten anomalen Myon-Ereignisse nicht mit der Kinematik einer Leptoquark-Produktion verträglich.

## Hadronischer Endzustand in tiefunelastischer Streuung

In mehreren Veröffentlichungen wurden Eigenschaften des in tiefunelastischer NC-Streuung erzeugten

hadronischen Endzustands untersucht mit dem Ziel, das Verständnis der Prozesse der starken Wechselwirkung zu erweitern. Der hadronische Endzustand wird durch die Wechselwirkung des ausgetauschten Eichbosons (dominant ein virtuelles Photon  $\gamma^*$ ) mit dem Proton erzeugt. Es wurden sowohl globale Charakteristika des hadronischen Endzustands untersucht, wie der Fluss transversaler Energie oder Ereignisvariable, die die Jet-Charakteristik der Ereignisse quantifizieren, als auch spezielle Endzustände, wie zum Beispiel die inklusive Produktion von  $\pi^0$ -Mesonen.

Die hohe, bei HERA erreichbare  $\gamma p$ -Schwerpunktsenergie erlaubt es, über weite kinematische Bereiche die experimentellen Resultate mit den Vorhersagen perturbativer QCD zu konfrontieren. Insbesondere ist es auch möglich, den Bereich sehr kleiner relativer Parton-Impulse  $x$ , in dem die Parton-Dichten stark ansteigen, mit genügend guter Auflösung zu untersuchen.

## Transversaler Energiefluss

Es wurde der Fluss von Energie transversal zur Photon-Proton-Richtung im hadronischen Schwerpunktsystem als Funktion der Skalenvariablen  $x$ ,  $Q^2$  und der Pseudorapidität  $\eta^*$  gemessen. Die Variable  $\eta^*$  ist direkt mit dem Polarwinkel  $\Theta$  korreliert, wobei hier positive Werte von  $\eta^*$  Teilchenproduktion in Photon-Richtung und negative solche in Proton-Richtung charakterisieren. Messungen des Energieflusses als Funktion von  $\eta^*$  erlauben es, die Hadron-Formation vom Photon-Fragmentationsbereich über den zentralen Bereich bis hin zum Proton-Fragmentationsbereich zu studieren.

Abbildung 7 zeigt für einen festen Wert der Photon-Proton Schwerpunktsenergie die Verteilung der mittleren transversalen Energie  $E_T$  als Funktion von  $\eta^*$  für verschiedene Werte der Photon-Virtualität  $Q^2$ . Es zeigt sich hier, dass das Maximum des  $E_T$ -Flusses mit  $Q^2$  ansteigt und sich dabei zu zentraleren Werten von  $\eta^*$  verschiebt.

Dies ist ein erster experimenteller Hinweis, dass auch im zentralen Bereich ( $-0.5 < \eta^* < 0.5$ ), das heißt außerhalb der Fragmentationsregion des Photons ( $2 < \eta^* < 3$ ), die mittlere transversale Energie mit der Photon-Virtualität  $Q^2$  ansteigt. Bei der tiefunelastischen

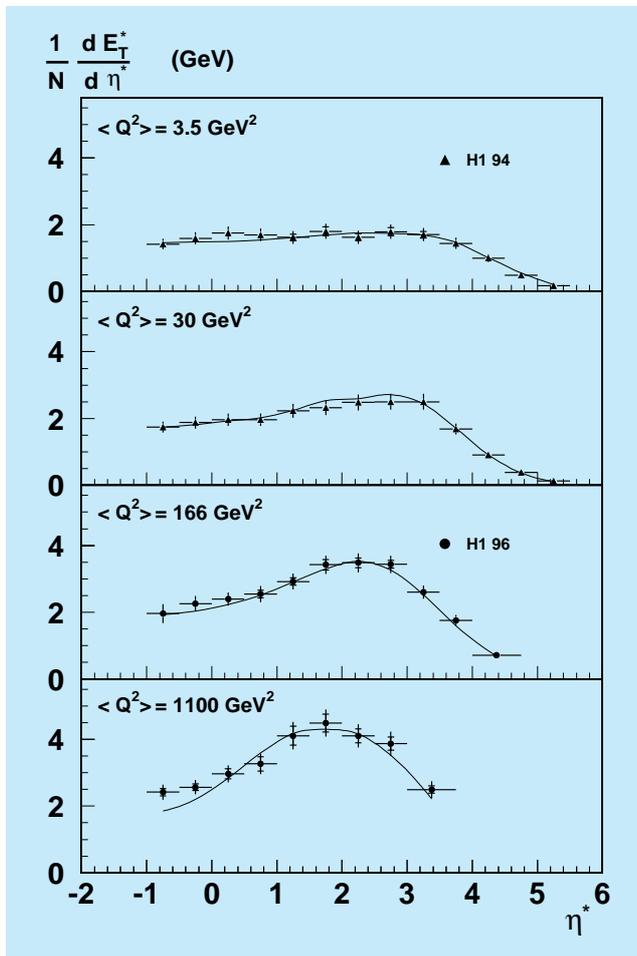


Abbildung 7: Der mittlere transversale Energiefluss in tiefunelastischen Streueignissen bei fester Photon-Proton-Schwerpunktsenergie als Funktion der Pseudorapidität  $\eta^*$  für verschiedene Bereiche der Photon-Virtualität  $Q^2$ , verglichen mit dem auf QCD basierenden Modell LEPTO. Mit wachsendem  $Q^2$  wird ein Anstieg von  $E_T$  beobachtet, wobei sich das Maximum vom Photon-Fragmentationsbereich ( $2 < \eta^* < 3$ ) zu kleineren  $\eta^*$ -Werten (zentraler Bereich) verschiebt.

ep-Streuung wird also eine charakteristische Abhängigkeit von der Photon-Virtualität  $Q^2$  beobachtet, die sich von der Unabhängigkeit vom „Projektil“, wie sie für den  $E_T$ -Fluss im zentralen Bereich bei Hadron-Hadron-Streuung bekannt ist, unterscheidet. Die Messung des  $E_T$ -Flusses wird gut von auf QCD basierenden Modellen beschrieben. Als Beispiel ist die Vorhersage des LEPTO-Modells in Abbildung 7 gezeigt.

## Jet-Charakteristika

In tiefunelastischer Streuung wurden über einen weiten Bereich der Photon-Virtualität ( $7 < Q < 100 \text{ GeV}$ ) Größen studiert, die die Jet-Struktur des hadronischen Endzustands quantitativ beschreiben. Dazu gehören unter anderem die Variablen „Thrust“, „Jet broadening“, Jetmasse und Zwei-Jet-Rate. In den Verteilungen dieser Variablen werden harte Streuprozesse sichtbar, die sich durch QCD-Störungsrechnungen beschreiben lassen. Allerdings werden diese QCD-Vorhersagen durch die Hadronisation der Partonen in die beobachtbaren Teilchen überlagert. In Abbildung 8 sind die Mittelwerte einiger dieser Ereignisvariablen als Funktion von  $Q$ , was hier der zur Hadronisation zur Verfügung stehenden Energie entspricht, dargestellt und mit der rein perturbativen sowie der um nichtperturbative Hadronisations-Effekte erweiterten QCD-Vorhersage verglichen. Hierbei wurde ein theoretischer Ansatz versucht, die Hadronisations-Effekte durch Potenzkorrekturen in  $1/Q$  mit einem nichtperturbativen universellen Parameter  $\bar{\alpha}_0$  zu beschreiben. In der Anpassung der Vorhersagen an die Daten sind die starke Kopplungskonstante  $\alpha_s$  und  $\bar{\alpha}_0$  die einzigen freien Parameter. Abbildung 9 zeigt die resultierenden Werte dieser Parameter für die Anpassungen an die verschiedenen Ereignisvariablen.

Es ist erstaunlich, dass die a priori sehr komplizierten Hadronisations-Effekte durch einen für die verschiedenen Variablen gemeinsamen Wert des Parameters  $\bar{\alpha}_0$  von  $\sim 0.5$  im Rahmen einer  $\pm 20\%$  Streuung beschrieben werden können. Allerdings streuen die bei den verschiedenen Ereignisvariablen erhaltenen Werte für  $\alpha_s$  und  $\bar{\alpha}_0$  mehr als aufgrund der experimentellen Unsicherheiten erwartet. Der hier untersuchte theoretische Ansatz, die Hadronisation durch Potenzkorrekturen zu berechnen, ist sicher ein vielversprechender erster Schritt und könnte möglicherweise durch Berücksichtigung höherer Ordnungen in  $\alpha_s$  verbessert werden.

## Inklusive $\pi^0$ -Produktion

Die zentrale Rapiditätsregion ist besonders sensitiv auf QCD-Effekte in der Formation des hadronischen Endzustands. Bei sehr kleinen Werten von  $x$  gibt es noch

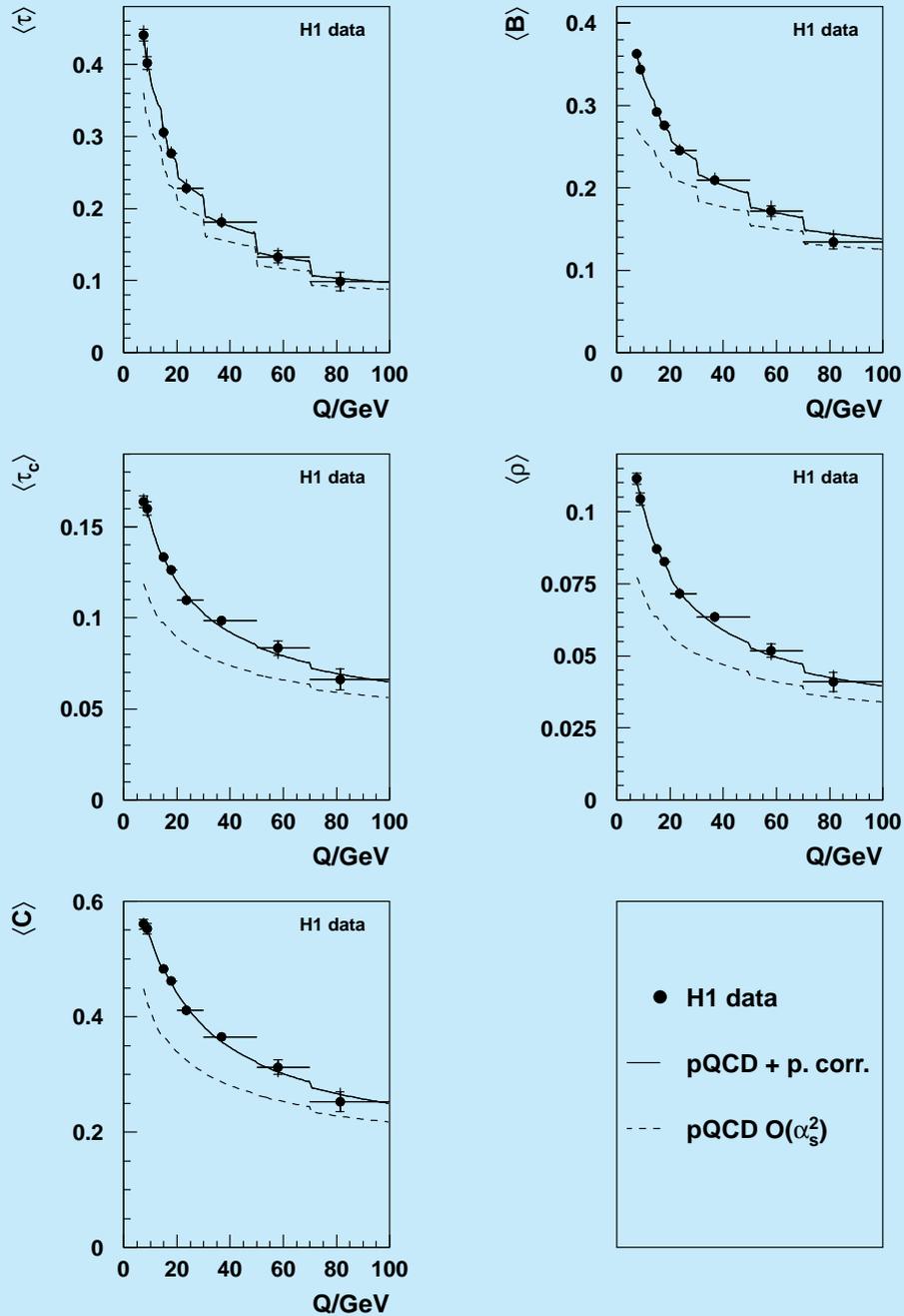


Abbildung 8: Mittelwerte einiger Variablen zur Charakterisierung der Jet-Struktur des hadronischen Endzustands in tiefinelastischer Streuung als Funktion der Photon-Virtualität  $Q$ . Die Messungen liegen für alle Variablen oberhalb der Erwartungen einer rein perturbativen QCD-Rechnung (gestrichelte Kurven). Die zusätzliche Berücksichtigung nichtperturbativer Hadronisations-Effekte durch Potenzkorrekturen in  $1/Q$  beschreibt die Messungen sehr gut (durchgezogene Kurven).

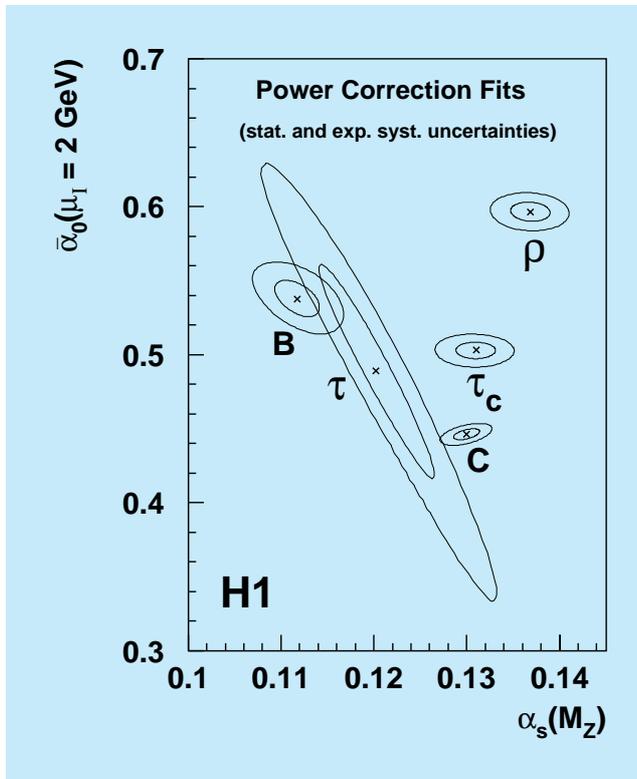


Abbildung 9: Fitresultate für die starke Kopplungskonstante  $\alpha_s$  und den Parameter  $\bar{\alpha}_0$ , der die Hadronisations-Effekte durch Potenzkorrekturen in  $1/Q$  beschreibt. Die Werte resultieren aus Anpassungen an verschiedene, die Jet-Struktur tiefinelastischer Streueignisse beschreibende Ereignisvariablen. Die Kurven beziehen sich auf die  $1\sigma$  und  $2\sigma$  Konfidenzgrenzen unter Berücksichtigung der experimentellen Unsicherheiten.

keine eindeutige perturbative QCD-Vorhersage. Verschiedene Approximationen (DGLAP, BFKL), die gerechnet wurden, machen unterschiedliche Vorhersagen für den Teilchenfluss in dieser Region. Insofern ist das Interesse an experimentellen Daten hier besonders groß.

Im Laborsystem entspricht die zentrale Rapiditäts-Region dem Bereich kleiner Polarwinkel relativ zur Proton-Richtung. Die H1-Kollaboration hat in diesem Bereich die inklusive Produktion von  $\pi^0$ -Mesonen als Funktion der Skalenvariablen  $x$  und  $Q^2$ , des Transversalimpulses und der Rapidität des  $\pi^0$  untersucht. Gegenüber früheren Messungen war es möglich, in Bereiche höherer Transversalimpulse vorzustoßen. Dies er-

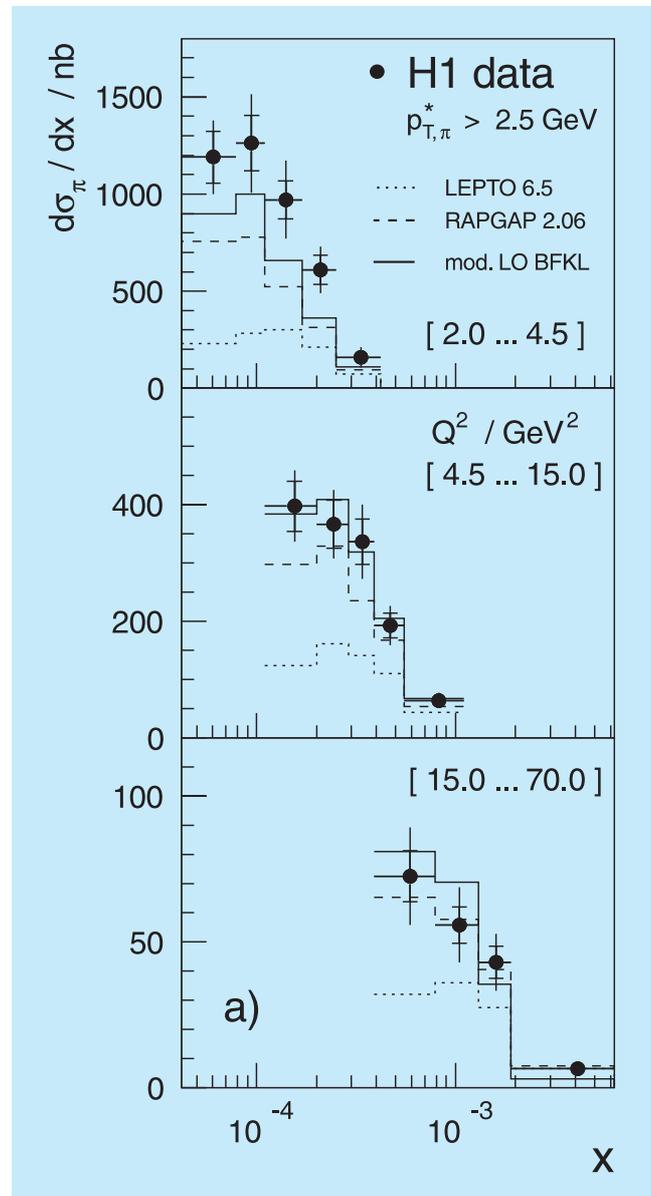


Abbildung 10: Inklusiver  $\pi^0$ -Produktionswirkungsquerschnitt als Funktion der Skalenvariablen  $x$  für drei Bereiche der Photon-Virtualität  $Q^2$ . Die Daten sind verglichen mit drei Modellen, die verschiedenen QCD-Approximationen entsprechen.

laubt sensitivere Vergleiche mit QCD-Vorhersagen zur Emission harter Partonen. Abbildung 10 zeigt den inklusiven  $\pi^0$ -Wirkungsquerschnitt als Funktion der Skalenvariablen  $x$  für drei Bereiche der Photon-Virtualität  $Q^2$ . Zu beobachten ist ein sehr starker Anstieg der  $\pi^0$ -

Produktion zu kleinen Werten von  $x$  in allen Bereichen von  $Q^2$ . Es zeigt sich auch, dass besonders im niedrigsten  $Q^2$ -Bereich die Daten sehr schlecht von den auf der DGLAP-Approximation beruhenden QCD-Vorhersagen beschrieben werden und besser mit einer BFKL-Entwicklung übereinstimmen. Da jedoch beide QCD-Rechnungen nur in führender Ordnung vorliegen, ist diese Präferenz vermutlich nicht die endgültige Antwort.

### Erzeugung schwerer Quarks

Im Berichtsjahr wurden zwei Publikationen veröffentlicht, die sich auf die Produktion schwerer Quarks in ep-Wechselwirkungen beziehen. Es wurden die Erzeugung des  $J/\psi$ -Mesons, einem gebundenen Zustand aus charm-anticharm-Quarks, und die inklusive Erzeugung von bottom-Quarks untersucht.

Die Produktion schwerer Quarks ist im Rahmen von Untersuchungen zur QCD besonders interessant, da die hohe Masse von charm- oder bottom-Quarks eine hohe Energieskala setzt, was störungstheoretische Berechnungen ermöglicht.

### Erzeugung von $J/\psi$ -Mesonen

Die Erzeugung von  $J/\psi$ -Mesonen ist bei HERA ausführlich in Photoproduktion, das heißt  $Q^2 \simeq 0$ , untersucht worden. Im Berichtsjahr wurde eine umfassende Studie zur  $J/\psi$ -Produktion mit virtuellen Photonen ( $Q^2 > 2 \text{ GeV}^2$ ) vorgelegt. Es wurden zwei Mechanismen unterschieden: der zahlenmäßig dominierende Prozess ist die elastische Erzeugung von  $J/\psi$ , bei der das gestreute Proton im Allgemeinen nicht beobachtet wird, das heißt es werden nur die Zerfalls-Leptonen des  $J/\psi$  im Detektor nachgewiesen. Der andere Mechanismus ist ein unelastischer, in dem das  $J/\psi$  zusammen mit weiteren Hadronen beobachtet wird.

Das  $J/\psi$  ist ein Vektormeson, wie auch die leichten  $\rho$ -,  $\omega$ - und  $\phi$ -Mesonen, und kann ebenso wie diese direkt an das vom Positron emittierte Photon koppeln und anschließend über einen diffraktiven Prozess am Proton gestreut werden. Diffraktive Streuung wurde bei niedrigen Energien sowohl in Hadron-Hadron Wechselwirkungen als auch in Photon-Hadron Streuung durch nicht-störungstheoretische Modelle beschrieben. Auch bei HERA liefern diese für die leichten Vektormesonen

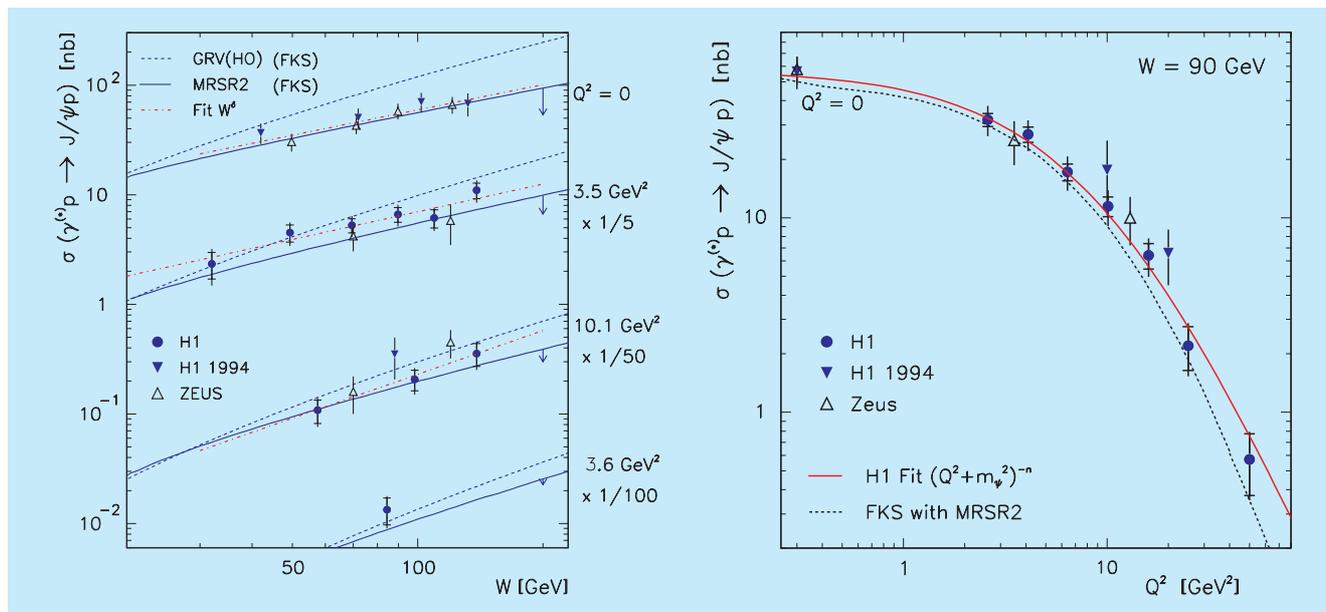


Abbildung 11: Der Wirkungsquerschnitt für elastische  $J/\psi$ -Produktion als Funktion der  $\gamma p$ -Schwerpunktsenergie  $W$  (links) und der Photon-Virtualität  $Q^2$  (rechts). Die eingezeichneten Kurven stellen einen Fit bzw. auf QCD basierende Modellvorhersagen dar.

zufriedenstellende Ergebnisse. Das  $J/\psi$ -Meson zeigt jedoch ein abweichendes Verhalten. Sein Wirkungsquerschnitt steigt deutlich schneller mit der Schwerpunktsenergie an als der der leichten Vektormesonen. Dies wurde als Anzeichen für einen harten Streuprozess gewertet, was theoretische Beschreibungen im Rahmen von QCD nahelegte. Hier wird der Erzeugungsprozess durch Austausch eines farbneutralen Systems von Gluonen beschrieben. Da die effektive Gluon-Dichte im Proton mit der Energie ansteigt, wächst der Wirkungsquerschnitt entsprechend. Dieser starke Anstieg ist in Abbildung 11 zu sehen. Er wird zufriedenstellend beschrieben von Modellen, die auf störungstheoretischer QCD beruhen.

Die unelastische Erzeugung von  $J/\psi$  ist ebenfalls gemessen und mit Vorhersagen, die im Rahmen der QCD gemacht werden, verglichen worden. Die Beschreibung der Daten durch diese theoretischen Ansätze ist nicht besonders erfolgreich. Dieser Prozess wurde oft als Testfall für die Behandlung der Farbe in QCD angesehen. Möglicherweise lässt sich mit Rechnungen in der nächsthöheren Ordnung eine bessere Beschreibung der Daten erreichen. Daran wird zur Zeit von Theoretikern gearbeitet.

### Produktion von bottom-Quarks

Schwere Quarks werden bei HERA in „Photon-Gluon-Fusion“ erzeugt: ein Photon, emittiert vom einlaufenden Positron, und ein Gluon, emittiert vom Proton, verschmelzen und bilden dabei ein  $c\bar{c}$ - oder ein  $b\bar{b}$ -Paar. Wegen der sehr viel höheren Masse von bottom-Quarks relativ zu charm-Quarks ( $m_b \sim 4.7 \text{ GeV}$ ,  $m_c \sim 1.4 \text{ GeV}$ ) erwartet man, dass erstere sehr viel seltener erzeugt werden. Die höhere Masse der bottom-Quarks als inhärente Skala gibt andererseits Grund zur Annahme, dass theoretische Berechnungen der Erzeugungswirkungsquerschnitte, die im Rahmen der QCD durchgeführt werden, zuverlässiger sind.

Die H1-Kollaboration konnte 1999 die erste Messung der  $b\bar{b}$ -Erzeugung bei HERA publizieren. Es wurde eine

klassische Methode benutzt: Das bottom-Quark zerfällt semileptonisch, was zu einem beobachteten Myon (10% der Fälle) und einem Teilchenjet führt. Wegen der hohen Masse des bottom-Quarks hat dieses Myon einen relativ hohen Transversalimpuls bezüglich der bottom-Flugrichtung. Dies erlaubt, bottom-Ereignisse von dem sehr viel häufigeren Untergrund von charm-Quarks und leichten Quarks abzutrennen. Leichte Quarks tragen zum Untergrund bei, da sie nach Hadronisation eine Myon-Signatur vortäuschen können, zum Beispiel durch den Zerfall geladener  $\pi$ -Mesonen. Durch Selektion von zwei Jets mit einer Energie von mehr als 6 GeV und eines Myons von mindestens 2 GeV konnte der Anteil von bottom-Quarks im Datensatz angereichert werden. Der gemessene Wert für den Wirkungsquerschnitt  $\sigma(\gamma p \rightarrow b\bar{b}X)$  liegt knapp zwei Standardabweichungen über der theoretischen Erwartung (Abb. 12), die in nächstführender Ordnung berechnet ist.

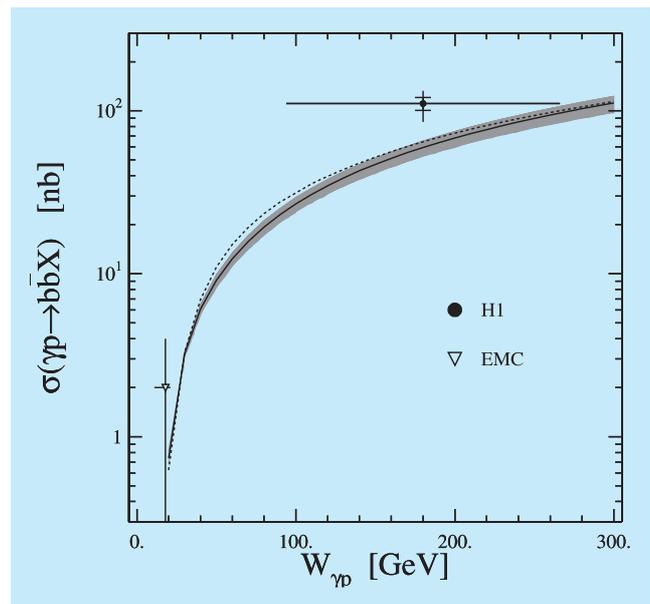


Abbildung 12: Der Wirkungsquerschnitt für inklusive Produktion von bottom-Quarks als Funktion der  $\gamma p$ -Schwerpunktsenergie  $W$ . Die eingezeichneten Kurven basieren auf QCD-Vorhersagen mit verschiedenen Parametrisierungen der Proton-Strukturfunktion.

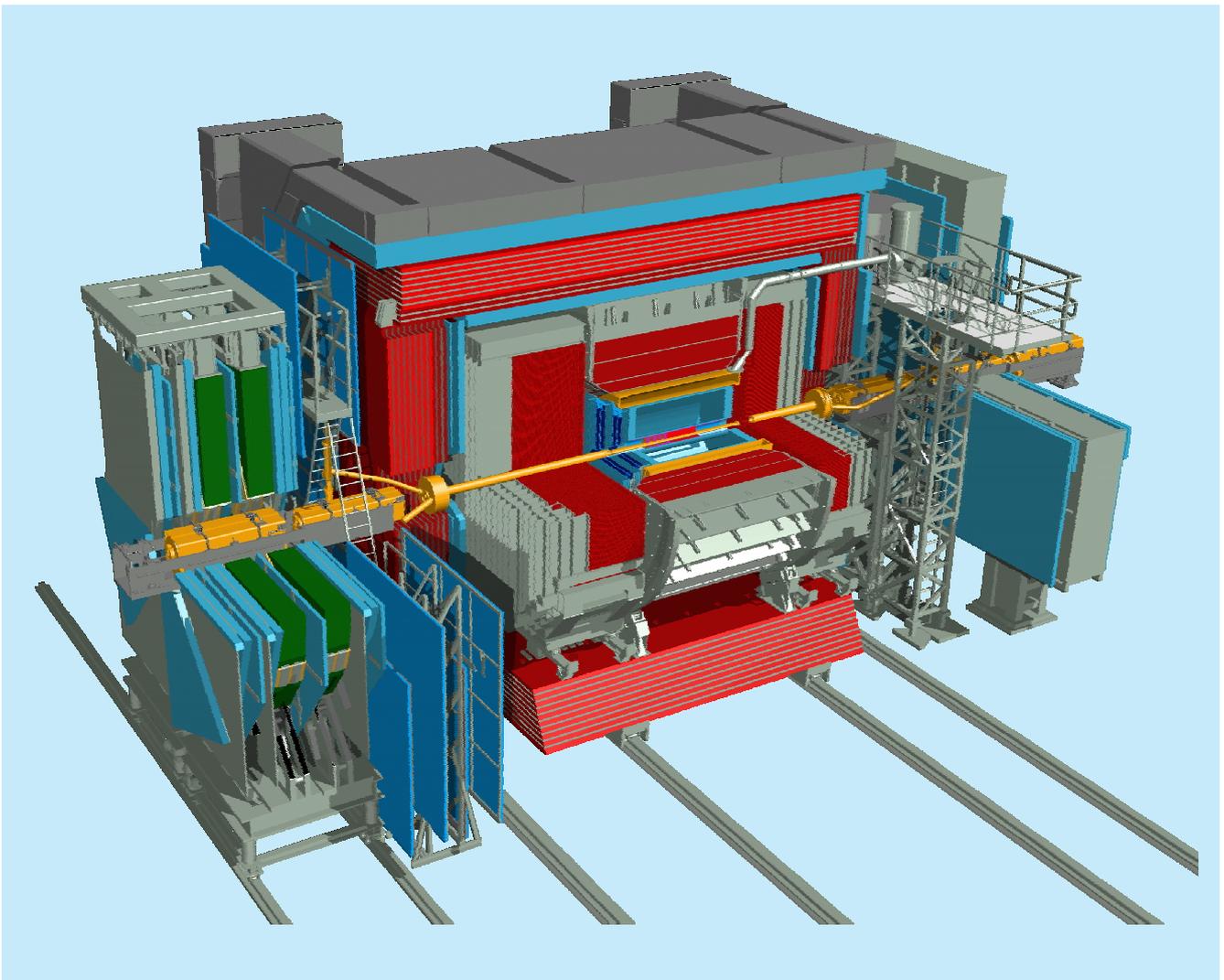


Abbildung 13: *Dreidimensionale Ansicht des ZEUS-Detektors mit dem Mikro-Vertex-Detektor und den supraleitenden HERA-Magneten.*

# ZEUS-Experiment

**Beteiligte Institute:** Univ. und INFN Torino Alessandria, 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 des ZEUS-Detektors wurde vom Herbst 1998 bis Dezember 1999 nur durch zwei kurze Wartungsperioden von etwa eineinhalb Monaten Dauer und anschließenden Maschinenstudien unterbrochen.**

**Bis Ende April 1999 wurden Elektron-Proton-Kollisionen entsprechend einer integrierten Luminosität von  $17 \text{ pb}^{-1}$  aufgezeichnet. In der folgenden Wartungsperiode wurde der HERA-Elektronenring auf Positronen umgestellt. Bis zum Ende des Luminositätsbetriebs im Dezember 1999 betrug die integrierte Luminosität mit Positron-Proton-Kollisionen  $18 \text{ pb}^{-1}$ . Die Strahl-Energien betragen  $920 \text{ GeV}$  (Protonen) und  $27.5 \text{ GeV}$  (Elektronen bzw. Positronen). Insgesamt stehen somit Datenmengen mit integrierten Luminositäten von  $66 \text{ pb}^{-1}$  mit  $e^+p$  Kollisionen und  $18 \text{ pb}^{-1}$  mit  $e^-p$  Kollisionen für die Physik-Analyse zur Verfügung.**

**Die beiden Wartungsperioden wurden für routinemäßige Wartungsarbeiten verwendet. Es gab keine größeren Reparaturen oder Umbauten des Detektors.**

**Im Laufe des Jahres 1999 wurde weiter intensiv an den neuen Detektorkomponenten gearbeitet, dem Mikro-Vertex-Detektor (MVD), dem „Straw Tube Tracker“ (STT) und einem neuen Luminositäts-Monitorsystem, die nach der HERA Luminositäts-erhöhung zum Einsatz kommen werden (Abb. 13). ZEUS hat in diesem Jahr 12 Veröffentlichungen verfasst. Einige der Physik-Resultate werden kurz vorgestellt.**

## Datennahme

Die Datennahme des ZEUS-Detektors ab Herbst 1998 erfolgte einschließlich der in der Wartungsperiode 1998 verbesserten oder neu eingebauten Detektorkomponenten: dem Vorwärts-Hadron-Elektron-Separator (FHES), dem Pre-Sample-Detektor vor dem zentralen Teil des Kalorimeters (BPRES), dem Vorwärts-Plug-Kalorimeter, einem Positionsdetektor vor dem Vorwärts-Neutron-Kalorimeter und einem Silizium-Spurdetektor vor dem Strahlrohr-Kalorimeter, außerdem mit der vervollständigten Elektronik zur Spurrekonstruktion im Eisenjoch („Backing Calorimeter“).

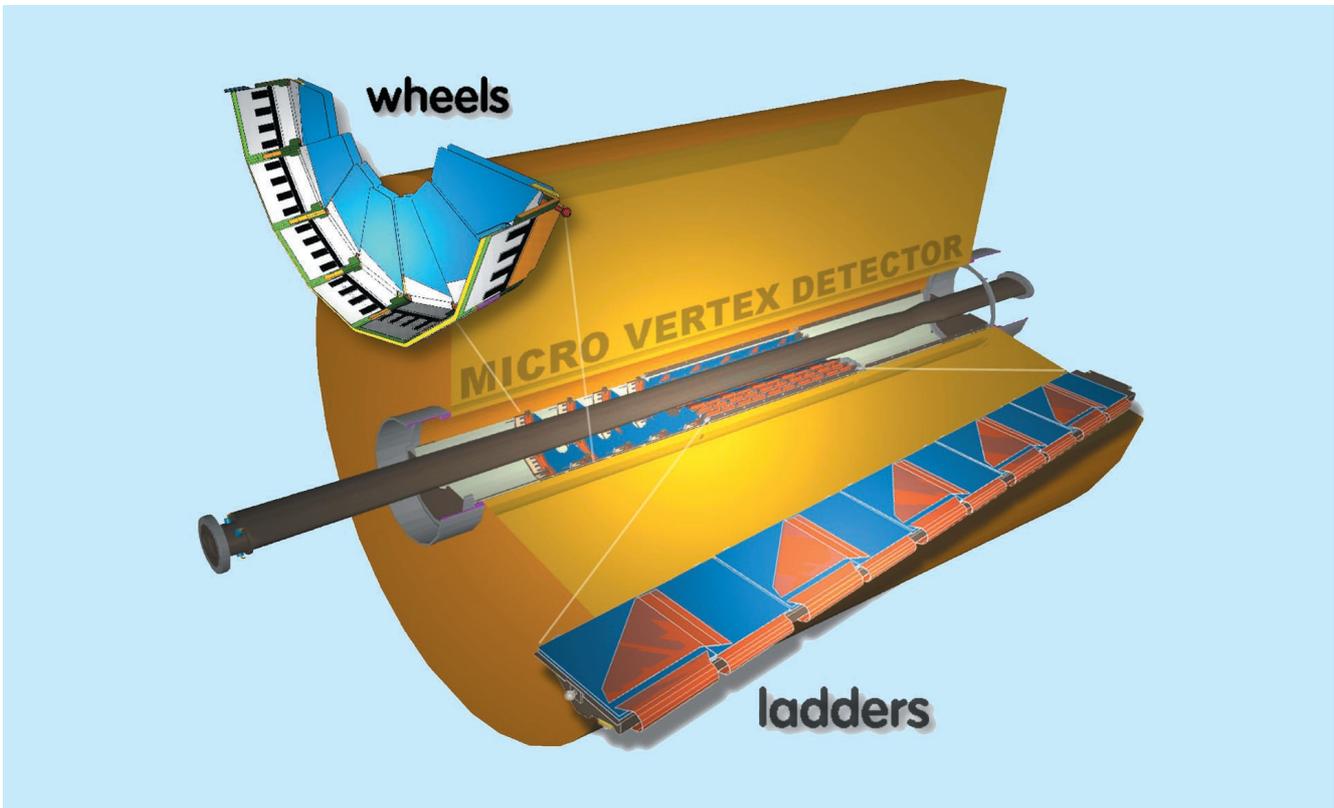


Abbildung 14: Ansicht des Mikro-Vertex-Detektors und des zentralen Strahlrohrs innerhalb des zentralen Spurdetektors. Die um das Strahlrohr angeordneten Komponenten des MVD, also die Leitern („ladders“) im Barrel-Detektor und die Halbringe („wheels“) des Vorwärtsdetektors sind noch einmal vergrößert dargestellt.

Die Triggerraten und Untergrundbedingungen bereiteten auch bei hohen Strahlströmen und der Design-Luminosität von HERA keine Schwierigkeiten. Die Totzeit des Datennahmesystems betrug in der Regel etwa 1%. Das zentrale Datennahmesystem wurde durch ein neues Überwachungssystem „Slow Control“, Erweiterung des Rechnernetzwerkes und ein neues Programm zur Qualitätskontrolle der aufgenommenen Daten weiter verbessert. Nach einem Probebetrieb konnte die Schichtbesetzung auf zwei Personen reduziert werden.

Im Offline-Bereich wurde der sogenannte „ZEUS Event Store“ eingeführt. Es handelt sich dabei um eine objektorientierte Datenbank, welche über 200 Variablen enthält, die für jedes Ereignis bei der Rekonstruktion berechnet werden.

## Neue Detektorkomponenten

Mehrere neue Detektorkomponenten sind zur Zeit für die im Jahr 2000 geplante Luminositätserhöhung von HERA im Bau.

### Mikro-Vertex-Detektor (MVD)

ZEUS wird in der Wartungsperiode im Jahr 2000 zur HERA Luminositätserhöhung einen neuen Mikro-Vertex-Detektor mit hochauflösenden Silizium-Streifendiolen einbauen. Abbildung 14 zeigt eine dreidimensionale Ansicht des MVD mit dem neuen zentralen Strahlrohr innerhalb des zentralen Spurdetektors.

Im Berichtsjahr wurden Entwurf und Konstruktion abgeschlossen, Prototypen hergestellt und getestet und mit der Produktion aller wesentlichen Komponenten begonnen.

Für die Detektormechanik sind die meisten Teile bereits angefertigt worden. So existieren schon viele der Haltestrukturen für die aktiven Detektormodule aus Kohlefaserwerkstoffen, das heißt die Leitern („ladders“ in Abb. 14) für den Barrel-Detektor und die Halbringe („wheels“ in Abb. 14) für den Vorwärts-Detektor. Der Kohlefaser-Zylinder mit den Flanschen zur Aufnahme und Positionierung der Leitern und Halbringe ist fertig. Die Versorgungsleitungen und Kabel werden anschließend in dem Zylinder verlegt. Dann werden die mit Detektormodulen bestückten Leitern und Halbringe eingebaut.

Jede der 30 Leitern im Barrel trägt zehn Detektormodule. Diese Module bestehen aus zwei  $6 \times 6 \text{ cm}^2$  großen Streifenzählern und der Frontend-Elektronik. Die acht Halbringe für den Vorwärtsdetektor tragen jeweils sieben Vorwärtsmodule, die aus einem 7.5 cm langen trapezförmigen Streifenzähler und der gleichen Frontend-Elektronik bestehen. Die Detektormodule werden seit Mitte 1999 am DESY in Hamburg und in Zeuthen gefertigt. Die Produktion soll bis Mitte 2000 abgeschlossen sein.

Für ein Barrel-Modul werden je zwei Zähler 2 mm überlappend mit Abstandsstücken hochpräzise verklebt. Die Auslesestreifen der beiden Dioden werden mit Fanout-Kabeln untereinander sowie mit dem Hybriden für die Frontend-Elektronik verbunden. Die flexiblen Verbindungskabel bestehen aus einer Upilex Folie mit vergoldeten Kupfer-Leiterbahnen. Sie werden präzise auf die Dioden und die Hybride geklebt. Die Kontakte werden mit einem Dünndrahtbonder gebondet. Die Modulfertigung findet in einem eigens dafür eingerichteten Reinraum statt.

Die Frontend-Ausleseelektronik ist in SMD-Technik auf einem Keramik-Substrat aufgebaut. Jeder Hybrid ist für die Auslese der 512 Kanäle eines Moduls zuständig. Dazu werden je vier ASICs des Typs HELIX-128 3.0 eingesetzt. Alle benötigten Chips sind geliefert und erfolgreich getestet worden. Die Produktion der Hybride hat begonnen.

Zur Qualitätssicherung der Modul-Produktion wird nach jedem Produktionsschritt die Strom-Spannungs-

Charakteristik der Dioden gemessen. Dioden mit zu großen Strömen werden aussortiert. Vor und nach dem Zusammenbau zu Modulen wird das Verhalten der Dunkelströme der Dioden mehrere Tage lang in einem Langzeittest beobachtet.

Um auch einzelne Auslesestreifen und -kanäle testen zu können, wurde ein Lasersystem entwickelt und gebaut. Jedes fertige Detektormodul wird unter dem auf  $20 \mu\text{m}$  fokussierten Strahl eines Halbleiterlasers verfahren. Die durch das gepulste Laserlicht induzierten Signale werden ausgelesen. Damit lassen sich Fehler in einzelnen Kanälen, wie etwa schlechte Verbindungen oder Kurzschlüsse, diagnostizieren. Die detaillierte Information steht für die spätere Datennahme und Kalibrierung zur Verfügung.

Die Infrastruktur, wie Kabel und „Patch-Panel“, Stromversorgungen, Kühlung und Verrohrung, wird vorbereitet. Von den zur Auslese der Frontend-Elektronik benötigten Modulen, wie den ADC-VME-Karten, „Clock&Control“-Einheiten, Analog-Link usw., existieren getestete Prototypen. Für das Detektor-Alignmentsystem mit Laserstrahlen, deren Position relativ zu Detektorkomponenten durch teildurchlässige Photodioden gemessen wird, wurden erfolgreich Tests aufgebaut.

Das System zur Datenauslese und -formatierung und das System zur Überwachung und Steuerung der Detektorparameter befinden sich in der Entwicklung. Es ist vorgesehen, die MVD-Daten einem Spurtrigger zur Verfügung zu stellen, der auch die Informationen von der zentralen und den vorwärtsgerichteten Kammern verarbeitet.

Es wurde mit der Entwicklung der zur Datenauswertung benötigten Software begonnen. Hauptschwerpunkte sind die Mustererkennung für die Spurrekonstruktion, der Spurfit und die Simulation des Detektors im ZEUS Monte Carlo-Programm.

Die Eigenschaften der Streifendetektoren wurden durch Messungen mit einem ortsauflösenden Testteleskop im DESY-Teststrahl untersucht. Die über die Detektoren gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt ein in die Entwicklung von Algorithmen zur Ortsbestimmung von Koordinaten und in die Simulation der Detektorsignale.

Für das Jahr 2000 ist die Installation des Detektors in ZEUS vorgesehen. Vor dem Einbau ist ein mehrmonati-

ger Testaufbau des Gesamtsystems zur Inbetriebnahme des Detektors geplant.

## Straw Tube Tracker (STT)

Der Vorwärtsspurdetektor von ZEUS besteht aus drei planaren Driftkammern und vier Übergangsstrahlungsdetektoren (TRDs). Für die HERA-Luminositätserhöhung werden die TRDs durch den sogenannten „Straw Tube Tracker“ (STT) ersetzt, der wie die TRDs aus vier Detektoren besteht. Jeder Detektor ist aus sechs Modulen zusammengesetzt, die jeweils einen Winkelbereich von  $60^\circ$  überdecken und quer zur Strahlrichtung angeordnet sind. Ein Teilchen durchquert insgesamt 24 Ebenen, die in vier verschiedenen Winkeln angeordnet sind.

Eine „Straw Tube“ (Strohalm) besteht aus einem sehr dünnen Rohr aus Kaptonfolie (7.5 mm Durchmesser,  $120\ \mu\text{m}$  Wanddicke) mit einem in der Mitte gespannten Draht, an den eine Hochspannung angelegt wird. Der STT enthält insgesamt etwa 11 000 Straw Tubes, die 20 bis 102 cm lang sind. Die Vorteile dieser Detekortechnologie, die für die LHC-Experimente entwickelt wurde, sind robustes Verhalten bei hohem Untergrund, eine gute Ortsauflösung von etwa  $140\ \mu\text{m}$  und eine geringe Hit-Multiplizität.

Nachdem ein Prototyp des Detektors gebaut und erfolgreich im Teststrahl untersucht wurde, ist der STT zur Zeit im Bau. Die beteiligten Institute sind MEPHI in Moskau, die Universitäten Bonn, Freiburg, Hamburg, Siegen, Tel Aviv, Toronto, York, Pennsylvania State, das Argonne National Laboratory sowie DESY. Die Produktion der Röhren in Moskau und das Verkleben zu Sektoren sind inzwischen abgeschlossen. Das Drahtspannen, der Zusammenbau und die Endkontrolle erfolgen zur Zeit in York, Freiburg, Moskau und bei DESY.

Abbildung 15 zeigt einen Teil eines STT-Sektors mit drei Lagen „Straw Tubes“. Die Hochspannungs- und Gasversorgung sind im Vordergrund.

Die bisherige Ausleseelektronik der TRDs mit etwa 2000 Kanälen soll für den STT weiter verwendet werden, was ein „Multiplexing“ der etwa 11 000 Kanäle erfordert. Die Frontend-Elektronik besteht deshalb aus zwei Boards. Das „Multiplex-Board“ befindet sich unmittelbar an den „Straws“, das Treiber-Board am Rand

des Detektors. Eine Prototypversion der Elektronik wurde am ANL getestet und anschließend bei Messungen am DESY-Teststrahl erfolgreich verwendet.

An den Programmen zur Rekonstruktion der Hits, zur Spurerkennung und zur Monte Carlo-Simulation wird gearbeitet.

## 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. Eine ebenso große 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. Dank der höheren Luminosität wird sich auch die Anzahl von Bremsstrahlungs-Photonen (Bethe-Heitler-Prozess) um das Fünffache erhöhen. Die größere Photonen-Rate erhöht auch die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Kollision der Elektronen- und Protonenstrahlen mehrere Photonen abgestrahlt und gleichzeitig im Photon-Kalorimeter nachgewiesen werden und so zu einer Verfälschung der Luminositätsmessung führen. Ohne eine Abschirmung von mehreren Strahlungslängen Dicke würde das jetzige Photon-Kalorimeter innerhalb kurzer Zeit durch Strahlenschäden beschädigt werden. Eine dickere Abschirmung würde aber die Energieauflösung des Kalorimeters verschlechtern und eine präzise Luminositätsmessung unmöglich machen.

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.



Abbildung 15: Teil eines STT-Sektors mit drei Lagen „Straw Tubes“. Die Hochspannungs- und Gasversorgung sind im Vordergrund.

Das bisherige Photon-Kalorimeter wird durch ein neues Kalorimeter (Szintillator-Blei-Sandwich) mit strahlenfestem Szintillator ersetzt. Zur Reduzierung des Synchrotronstrahlungs-Untergrunds befindet sich unmittelbar vor dem Kalorimeter ein sogenannter aktiver Filter aus Kohlenstoff mit vier Strahlungslängen Dicke. Der Filter ist in zwei Teile unterteilt, hinter denen sich jeweils ein Aerogel-Cherenkov-Detektor befindet. Die niederenergetischen Photonen der Synchrotronstrahlung werden in den Cherenkov-Detektoren nicht nachgewiesen. Der Energieverlust von Bethe-Heitler-Photonen im Filter wird dagegen gemessen und zur Korrektur der Energiemessung verwendet.

Monte Carlo-Studien und Teststrahlungsmessungen haben gezeigt, dass die Energieauflösung des Photon-Kalorimeters mit dem aktiven Filter entscheidend verbessert werden kann. Die Cherenkov-Detektoren können außerdem dazu verwendet werden, den Beitrag von Mehrfach-Photonen zu reduzieren.

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- und Positronpaare werden durch einen Dipolmagneten abgelenkt und mit zwei kleinen Kalorimetern,

die unmittelbar vor dem Photon-Kalorimeter angeordnet sind, gemessen. Als Detektoren werden die beiden Module des jetzigen Strahlrohr-Kalorimeters verwendet, die für die HERA-Luminositäts-erhöhung ausgebaut werden müssen. Der Vorteil dieser Messmethode besteht in einer entsprechend geringeren Anzahl von Photonen im Spektrometerdetektor aufgrund der geringen Konversionswahrscheinlichkeit, das heißt es gibt keine Mehrfach-Photonen, Synchrotronstrahlungs-Untergrund und Strahlungsschäden.

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

## Vorbereitung auf die Luminositäts-erhöhung von HERA

Die Luminositäts-erhöhung von HERA erfordert den Einbau von supraleitenden Strahlführungsmagneten in den ZEUS-Detektor. Abbildung 13 zeigt eine dreidimensionale Darstellung des Detektors mit den neuen HERA-Magneten. Dies erfordert eine Reihe von Modifikationen, unter anderem ein neues zentrales Strahlrohr, Lagerung der Magnete, Einbau der Helium-Kryoversorgung, Verbesserung der magnetischen Abschirmung des Kalorimeters (F/RCAL), Entfernen des Vorwärts-Plug-Kalorimeters und des Strahlrohr-Kalorimeters sowie Änderungen der Infrastruktur. Außerdem muss der gesamte ZEUS-Detektor um 10 mm in Richtung Süden, HERA-Ring außen, verfahren werden. Die jeweiligen Konstruktionen sind inzwischen weitgehend abgeschlossen.

## Physikalische Ergebnisse

Im Folgenden werden einige der von ZEUS im Jahre 1999 veröffentlichten Physikresultate diskutiert.

## $\gamma^*p$ -Streuung im Übergangsbereich zwischen hohen und niedrigen $Q^2$

Über die Messung der totalen und diffraktiven Photon-Proton-Wirkungsquerschnitte wurden bei HERA neue Erkenntnisse über die Parton-Dynamik von Gluonen und Quarks in der Elektron-Proton-Streuung gewonnen. Es wird ein steiler Anstieg des totalen  $\gamma^*p$ -Wirkungsquerschnitts mit der  $\gamma^*$ -Schwerpunktsenergie  $W$  beobachtet. Der Anstieg wurde zunächst bei Werten von  $Q^2$  oberhalb einiger  $\text{GeV}^2$  gemessen, dabei ist  $Q^2$  die Photon-„Virtualität“, die das räumliche Auflösungsvermögen des Photons bestimmt. Dieses Verhalten des Wirkungsquerschnitts ist in der Theorie der starken Wechselwirkung, der störungstheoretischen QCD, beschreibbar.

Das ZEUS-Experiment hat mit Hilfe des BPC, eines nahe am Strahl eingebauten Kalorimeters, den  $\gamma^*p$ -Wirkungsquerschnitt bei sehr niedrigen Werten von  $Q^2$  zwischen  $0.11 \text{ GeV}^2$  und  $6.5 \text{ GeV}^2$  gemessen. Mit Hilfe eines neuen Spurteleskops vor dem Kalorimeter wurde der kinematische Bereich bis hinunter zu  $Q^2 = 0.045 \text{ GeV}^2$  erschlossen und die Auflösung wurde verbessert. Zusammen mit bereits veröffentlichten Daten konnte die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts von  $W$  und  $Q^2$  in einem großen Bereich bestimmt werden.

Abbildung 16 (links) zeigt, dass der steile Anstieg des Wirkungsquerschnitts mit  $W$ , der bei hohen Werten von  $Q^2$  sichtbar ist, bei niedrigeren Werten von  $Q^2$  deutlich gedämpft wird. Wie Abbildung 16 (rechts) zeigt, wird bei größeren Werten von  $Q^2$  ein Abfall des Wirkungsquerschnitts  $\sim 1/Q^2$  beobachtet, was dem Verhalten einer punktförmigen Wechselwirkung des Photons mit den Quarks im Proton entspricht. Dagegen flacht bei kleinen Werten von  $Q^2$  diese Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts von  $Q^2$  deutlich ab. Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass in diesem Bereich auch die Dämpfung des Anstiegs des Wirkungsquerschnitts mit  $W$  einsetzt und dieses Abflachen mit dem Übergang von der punktförmigen Wechselwirkung bei größeren  $Q^2$ -Werten zu einer ausgedehnten Wechselwirkung bei niedrigen Werten von  $Q^2$  verbunden ist.

Diese Ergebnisse über die Wechselwirkung von Photonen mit Materie können zum Verständnis des Übergangs von der tiefunelastischen punktförmigen Streu-

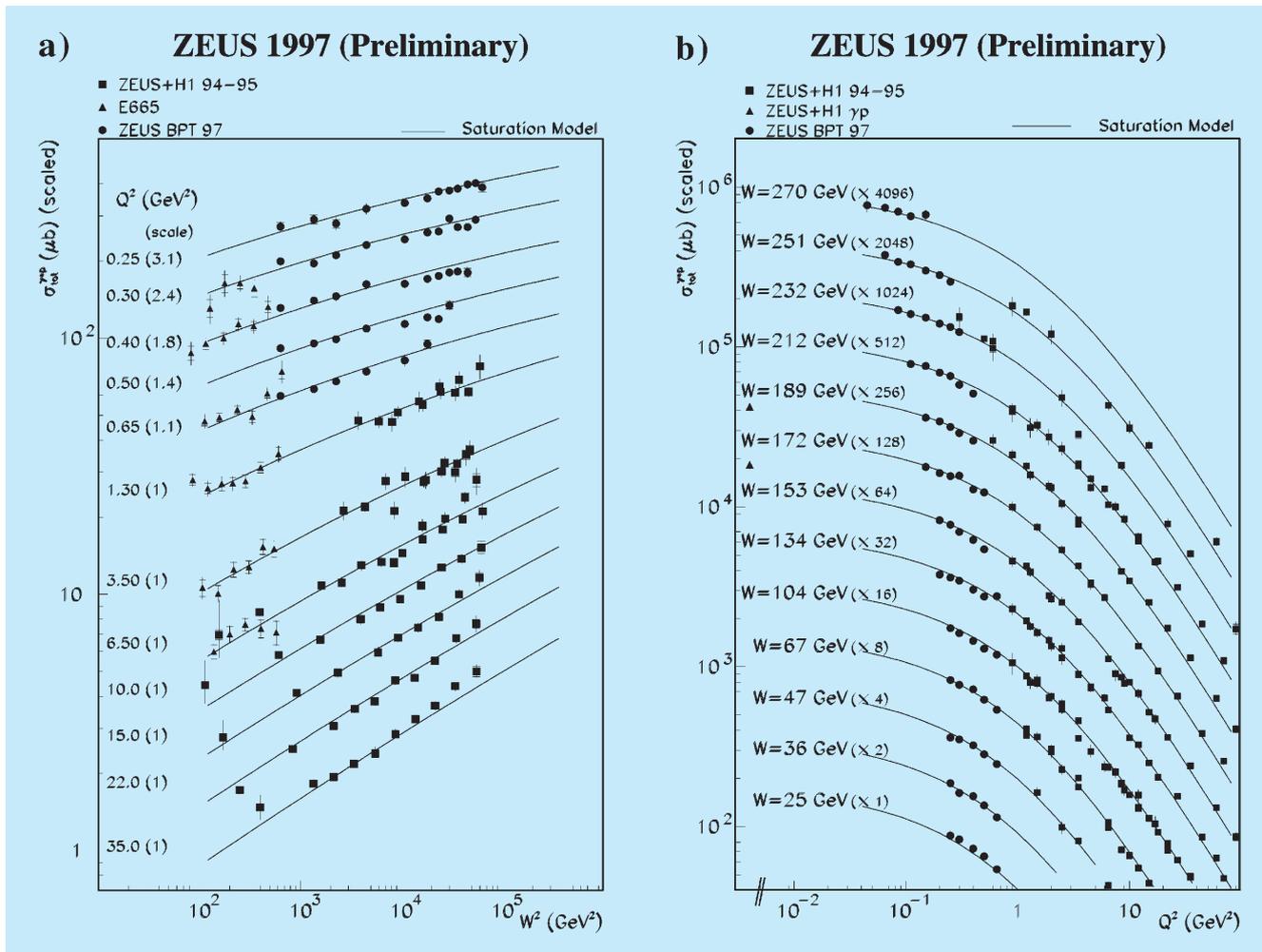


Abbildung 16: Links:  $\gamma^* p$ -Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $W^2$  bei festen Werten von  $Q^2$ ; rechts:  $\gamma^* p$ -Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $Q^2$  bei festen Werten von  $W$ ; die Linien zeigen die Anpassung durch ein Sättigungsmodell von Golec-Biernat und Wüsthoff.

ung des Photons an Partonen, die von der störungstheoretischen QCD beschrieben wird, zum Bereich der Hadron-Physik und des „Confinements“ Wesentliches beitragen.

Man kann die  $\gamma^* p$ -Wechselwirkung als einen Zweistufen-Prozess betrachten. Nach der Heisenbergschen Unschärferelation kann sich das einlaufende virtuelle Photon kurzzeitig in ein Quark-Antiquark-Paar  $q\bar{q}$  verwandeln. Im Schwerpunktsystem des Protons hat das Photon eine sehr hohe Energie, in der Größenordnung von mehreren tausend Proton-Massen, und durch die relativistische Dilatation kann der  $q\bar{q}$ -Zustand lange vor

der eigentlichen Wechselwirkung mit dem Proton entstanden sein. Das  $q\bar{q}$ -Paar hat also Zeit, sich durch mehrere QCD-Abstrahlungen mit einer Wolke aus weiteren Quarks und Gluonen zu umgeben. Auch das einlaufende Proton führt eine Wolke aus Quarks und Gluonen mit sich. Die Partonen aus der Strahlungswolke des Photons können mit denjenigen aus der Proton-Wolke wechselwirken, die dieselbe transversale Ausdehnung haben.

Der Wirkungsquerschnitt hängt dabei von der Anzahl der Partonen in den beiden Wolken ab. Die Zahl der Partonen hängt wiederum von  $W$  und  $Q^2$  ab. Bei wach-

sender Energie haben die Wolken mehr Zeit für die Abstrahlung weiterer Partonen. Die transversale Größe  $r$  des  $q\bar{q}$ -Paares hängt von  $Q^2$  ab,  $r^2 \sim 1/Q^2$ . Bei großen Werten von  $Q^2$ , wo die Wechselwirkung fast punktförmig ist, ist auch die transversale Ausdehnung des  $q\bar{q}$ -Paares klein. In diesem Fall wird die Abstrahlung der Gluonen und Quarks durch die störungstheoretische QCD beschrieben. Die Feldgleichungen der QCD sagen eine raschen Zunahme der Anzahl der Partonen mit  $Q^2$  und  $W$  voraus, und dies führt zum steilen Anstieg des Wirkungsquerschnitts. Wenn die Partondichte so weit angewachsen ist, dass mehrere Gluonen aus der Photon-Wolke gleichzeitig entsprechende Partner in der Proton-Wolke finden, setzen Sättigungseffekte ein. Die paarweise oder, allgemeiner gesagt, kohärente Wechselwirkung der Partonen der beiden Wolken führt zur Dämpfung des Anstiegs des Wirkungsquerschnittes mit  $W$ .

Die Vorhersage eines einfachen Modells, das aus diesem physikalischen Bild entwickelt wurde und das die Sättigungseffekte parametrisiert, ist in Abbildung 16 gezeigt. Die Daten für den totalen Wirkungsquerschnitt und ebenso der diffraktive Wirkungsquerschnitt werden durch dieses Modell ebenfalls gut beschrieben.

## Helizitätserhaltung bei der Erzeugung von $\rho^0$ -Mesonen

Die QCD ist als Störungstheorie der starken Wechselwirkung nur dann anwendbar, wenn die von der Energieskala abhängige Kopplungskonstante klein genug ist, das heißt bei Skalen  $\gg 1 \text{ GeV}^2$ . Im „Confinement“-Bereich kann die QCD zur Zeit keine Aussagen machen, stattdessen benutzt man Modelle, um die Wechselwirkung zu beschreiben.

Wenn das Photon, wie oben beschrieben, in ein Quark-Antiquark-Paar fluktuiert, kann es ein Vektormeson, zum Beispiel ein  $\rho^0$ -Meson, bilden. Die Wechselwirkung des Photons mit dem Proton verhält sich dann wie eine Streuung von zwei Hadronen. Etwa 10% dieser Streuungen geschehen elastisch. Im Endzustand zerfällt das gestreute Meson nach  $10^{-23}$  sec in ein positiv und ein negativ geladenes Pion, die im Detektor nachgewiesen werden.

Man kann elastisch gestreute Photonen über die Zerfallsprodukte des  $\rho^0$ -Mesons auch in Ereignissen fin-

den, wo das Photon einen größeren Impulsübertrag  $Q^2$  trägt. Wie erwähnt bestimmt die „Virtualität“ des Photons die Konfiguration des Quark-Antiquark-Zustands während der Streuung, wobei die transversale Ausdehnung des Paares umgekehrt proportional zu  $Q$  ist. So kann die starke Wechselwirkung als Funktion der Ausdehnung des Quark-Antiquark-Zustandes studiert werden.

Man weiß, dass bei solch „peripheren“ Streuungen die Helizität erhalten bleibt und nennt das „Helizitätserhaltung im s-Streukanal“ (SCHC). Aus der Winkelverteilung der beiden Zerfalls-Partonen lassen sich Rückschlüsse auf die Helizität des  $\rho^0$ -Mesons ziehen und die Hypothese der Helizitätserhaltung lässt sich so überprüfen.

Das ZEUS-Experiment hat die Helizitätsamplituden für den Prozess der Elektroproduktion von  $\rho^0$ -Mesonen gemessen. Man findet, dass sich mit einer Wahrscheinlichkeit von etwas weniger als 10% die Helizität während des Streuvorgangs ändert, und es zeigt sich damit eine Verletzung der SCHC. Die SCHC-Verletzung zeigt Abbildung 17, wo die 15 gemessenen Parameter der Spin-Dichtematrix zusammen mit der Vorhersage der SCHC (gestrichelte Linie) gezeigt sind.

Es gibt verschiedene Ansätze, die dynamische Ursache der Helizitätsverletzung zu erklären. Die störungstheoretischen Modelle lehnen sich an die QCD an und gelten daher erst bei größeren  $Q^2$ . Sie beschreiben die „periphere“ Streuung durch den Austausch zweier kohärenter Gluonen. Die durchgezogene Linie in Abbildung 17 zeigt die Vorhersage eines solchen Modells. Tatsächlich werden viele Aspekte der ZEUS-Daten durch die QCD-Modelle recht gut beschrieben.

## Zwei-Jet-Ereignisse und „Resolved Photon“-Komponente bei größeren $Q^2$

Auch in der Photoproduktion, also der Streuung reeller Photonen an Protonen bei  $Q^2 \sim 0$ , gibt es Prozesse, die in der QCD störungstheoretisch berechnet werden können. Das fast reelle Photon fluktuiert in ein Quark-Antiquark-Paar. In einzelnen Ereignissen kann genug Transversalenergie auftreten, um einen „harten“ Sub-Prozess zwischen den Partonen des Photons und

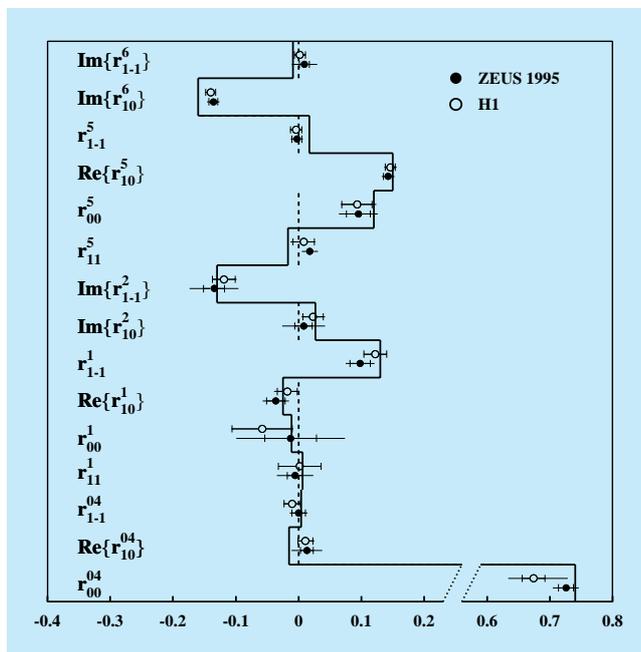


Abbildung 17: Ergebnisse für die 15 Parameter der  $\rho^0$ -Spin-Dichtematrix, die aus den gemessenen Winkelverteilungen der Pionen aus  $\rho^0$ -Zerfällen gewonnen wurden. Die Symbole zeigen die HERA-Resultate. Die gestrichelte Linie ist die Vorhersage der SCHC, die durchgezogene Linie zeigt die Vorhersage des QCD-Modells von Ivanov und Kirschner.

des Protons zu ermöglichen. Solche Ereignisse werden selektiert, indem man die auslaufenden Partonen als Hadron-Jets mit großer Transversalenergie im Detektor nachweist.

Dabei kann das Quark-Antiquark-Paar direkt in den harten Subprozess eingehen, man spricht von einem „Direct Photon“-Ereignis. Dagegen handelt es sich um ein „Resolved Photon“-Ereignis, wenn nur ein Teil der Energie des Photons am harten Subprozess teilnimmt, und demnach weitere Partonen des Photons weiterfliegen.

Das ZEUS-Experiment hat nun gemessen, wie sich der Anteil der „Resolved Photon“-Prozesse am Wirkungsquerschnitt als Funktion der Photon-Virtualität  $Q^2$  verhält. Man geht daher der Frage nach, bei welchem Impulsübertrag das Photon nur noch „punktförmig“ an der Wechselwirkung teilnimmt bzw. nur noch

die direkte Kopplung des Photons an ein Quark des Protons zu dem Prozess beiträgt.

In Ereignissen mit zwei Hadron-Jets misst die Größe  $x_\gamma^{\text{OBS}}$  den Energieanteil der beiden Jets an der Energie des Photons. Für ein „Resolved Photon“-Ereignis verlangt man  $x_\gamma^{\text{OBS}} < 0.75$ . Man misst dann das Verhältnis der Anzahl von Zwei-Jet-Ereignissen mit  $x_\gamma^{\text{OBS}} < 0.75$  zu denen mit  $x_\gamma^{\text{OBS}} > 0.75$  als Funktion von  $Q^2$ .

In Abbildung 18 ist das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte als Funktion von  $Q^2$  gezeigt, wobei für die Transversalenergie der Jets mindestens 5.5 GeV (a) bzw. mindestens 6.5 GeV (b) gefordert wurden. Der „Resolved Photon“-Anteil nimmt mit  $Q^2$  stark ab. Im Vergleich mit QCD-Rechnungen (mit JetViP bezeichnete Linien) bleibt das Verhältnis jedoch auch noch bei  $Q^2 = 4.5 \text{ GeV}^2$  groß. In dem Monte Carlo-Modell (mit HERWIG bezeichnet) bleibt das Verhältnis durch Partonschauer-Effekte größer als null, jedoch kann keines der Modelle alle Datenpunkte befriedigend beschreiben.

Man kann dieses Ergebnis so interpretieren, dass die „Resolved Photon“-Komponente auch bei größeren  $Q^2$  nicht verschwindet.

## Wirkungsquerschnitt für Jets in Vorwärtsrichtung

Im Bild der Elektron-Proton-Wechselwirkung als tief-unelastische Streuung (DIS) tauscht das Elektron direkt mit einem Quark im Proton ein Photon mit dem Impulsübertrag  $Q$  aus und schlägt so einen Quark-Jet mit transversaler Energie  $E_{T,\text{jet}}$  aus dem Proton heraus. Dem steht komplementär das bereits erwähnte Bild gegenüber, in dem das Wechselwirkungs-Photon zwischen Elektron und Proton sich zunächst in ein Quark-Antiquark-Paar aufspaltet, bevor dieses hadronische System dann mit dem Proton wechselwirkt. Welches dieser Bilder die Phänomene der Elektron-Proton-Streuung erfolgreich beschreibt, hängt vom kinematischen Bereich der Wechselwirkung ab und davon, welche Energieskala den betrachteten Prozess bestimmt.

Die ZEUS-Kollaboration hat den Wirkungsquerschnitt für die Erzeugung von Teilchenjets in Vorwärtsrichtung, also in Richtung des einlaufenden Protons und

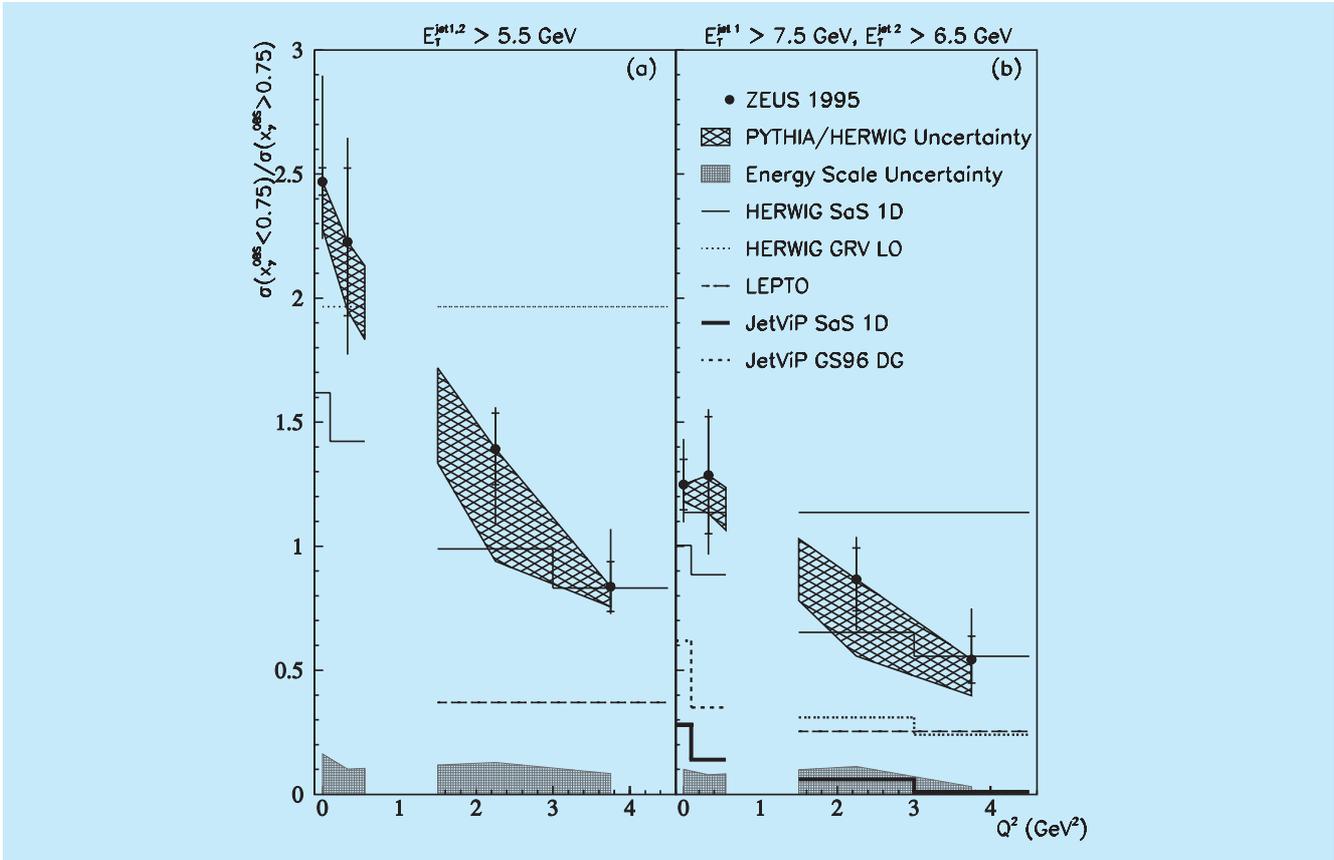


Abbildung 18: Das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für die Erzeugung zweier Hadron-Jets,  $\sigma(x_\gamma^{OBS} < 0.75)/\sigma(x_\gamma^{OBS} > 0.75)$ , als Funktion von  $Q^2$ , für (a) niedrige und (b) höhere Jet-Transversalenergie-Schwellen. Die Linien zeigen die Vorhersagen verschiedener Modellrechnungen.

des auslaufenden Proton-Rests, gemessen. Für diese Ereignisse sind sowohl der Impulsübertrag  $Q$  als auch die Jet-Energie  $E_{T,jet}$  bestimmend, also zwei voneinander unabhängige Energieskalen. Beide Skalen variieren bei HERA über einen weiten Bereich. Der Jet-Wirkungsquerschnitt wurde als Funktion des Verhältnisses  $E_{T,jet}^2/Q^2$  zwischen  $10^{-2}$  und  $10^2$  gemessen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 19. Da nur Ereignisse ausgewählt wurden, in denen beide Energieskalen „groß“ sind,  $Q^2 > 10 \text{ GeV}^2$  und  $E_{T,jet}^2 > 25 \text{ GeV}^2$ , sollten störungstheoretische QCD-Rechnungen des Wirkungsquerschnitts anwendbar sein. Während alle betrachteten Modelle mit den Messungen im Bereich kleiner  $E_{T,jet}^2/Q^2$  übereinstimmen, gibt es nur zwei Rechnungen bzw. Modelle, die über den gesamten Bereich den Wirkungsquerschnitt vorhersagen können. Diese

beiden Ansätze sind ebenfalls in Abbildung 19 gezeigt. In der ersten Rechnung wurde exakt bis zu einer bestimmten Ordnung in der starken Kopplungskonstanten gerechnet (Next-to-Leading-Order-Programm JetViP, gepunktete Linie). Im anderen Modell wurde nur die führende Ordnung exakt gerechnet und die Beiträge höherer Ordnung durch phänomenologische Beschreibungen berücksichtigt (RAPGAP, durchgezogene Linie). Beide Modelle benutzen den Ansatz des sich in ein Quark-Antiquark aufspaltenden Photons, der also die „Resolved Photon“-Komponente berücksichtigt. Es zeigt sich, dass dieser Beitrag für  $E_{T,jet}^2/Q^2 > 1$  bei kleinen Bjorken- $x$  auch bei hohen  $Q^2$  wichtig ist.

Dies Ergebnis ist insofern zunächst überraschend, als man für tiefunelastische Streuung bei  $Q^2 > 10 \text{ GeV}^2$

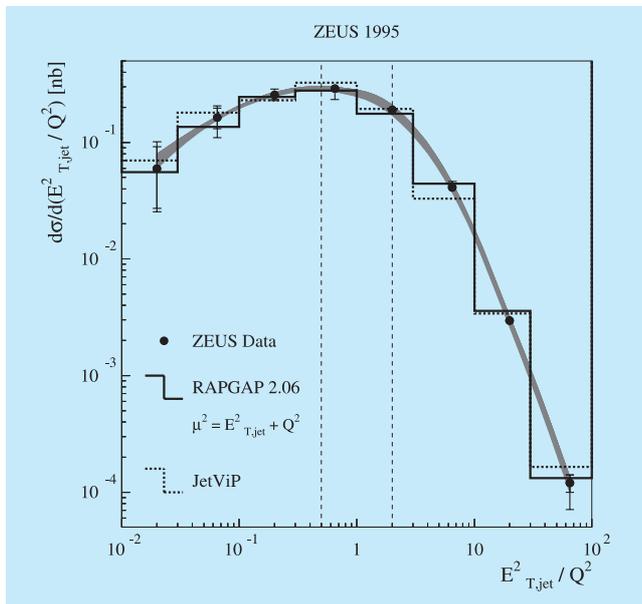


Abbildung 19: Wirkungsquerschnitt für die Produktion von Jets in Vorwärtsrichtung als Funktion von  $E_{T,jet}^2/Q^2$ . Gezeigt sind auch die Vorhersagen einer phänomenologischen Beschreibung (durchgezogene Linie) und einer Next-to-Leading-Order QCD-Rechnung (gepunktete Linie).

bisher annahm, das Photon als punktförmiges Teilchen behandeln zu können. Wenn aber die transversale Energie des Quark-Jets größer wird als der Impulsübertrag des Photons, gilt dieses Bild in seiner einfachen Form offenbar nicht mehr. Die Beiträge der hadronischen „Resolved Photon“-Komponente sind offenbar auch bei großer „Virtualität“  $Q^2$  des Photons wichtig und tragen wesentlich zum Wirkungsquerschnitt bei.

Das Bild von der tiefunelastischen Streuung zwischen Elektron und Proton muss also entsprechend modifiziert werden.

### Messung der Wirkungsquerschnitte für neutrale und geladene Ströme bei hohen $Q^2$

Die Messungen der Wirkungsquerschnitte für neutrale und geladene Ströme bei hohen  $Q^2$  überprüfen die präzisen Vorhersagen des Standard-Modells der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung. Von 1998 bis April 1999 wurde HERA mit Elektronen anstatt mit Positronen betrieben. So können nun  $e^+p$ - und

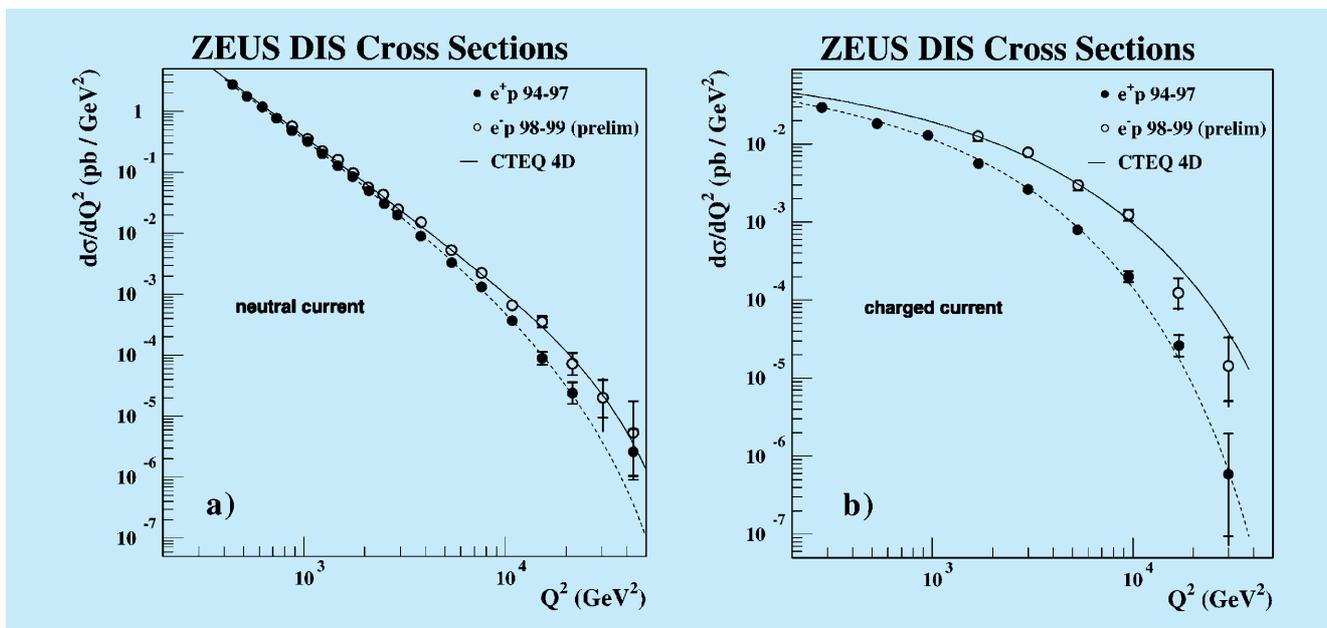


Abbildung 20: Vergleich der differentiellen Wirkungsquerschnitte für neutrale Ströme (links) und für geladene Ströme (rechts) in  $e^+p$  und  $e^-p$  Wechselwirkungen. Die Vorhersagen des Standard-Modells sind als Linien dargestellt.

$e^-p$ -Wirkungsquerschnitte analysiert und verglichen werden.

Die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch der schweren Vektorbosonen  $W^\pm$  und  $Z^0$  vermittelt. Photon und  $Z^0$  sind beide elektrisch neutral und tragen zu denselben Endzuständen bei. Die Wechselwirkungen, die sie vermitteln, werden als neutrale Ströme (NC für „neutral current“) bezeichnet. Die Interferenz zwischen Photon- und  $Z^0$ -Austausch trägt zur  $e^+p$ - und  $e^-p$ -Streuung mit unterschiedlichem Vorzeichen bei, da die elektrische Ladung von Elektron und Positron unterschiedlich, die schwache Ladung aber gleich ist. Abbildung 20 zeigt links den NC-Wirkungsquerschnitt, gemessen als Funktion von  $Q^2$ . Für  $Q^2$ -Werte zwischen 400 und 50 000  $\text{GeV}^2$  fällt der Wirkungsquerschnitt um sechs Größenordnungen ab, hauptsächlich bedingt durch den Photon-Propagator,  $d\sigma/dQ^2 \propto 1/Q^4$ . Für  $Q^2$ -Werte  $> 3000 \text{ GeV}^2$  zeigt sich ein klarer Unterschied zwischen den beiden Ladungszuständen. Der Wirkungsquerschnitt für  $e^-p$ -Streuung ist größer als der für  $e^+p$ -Streuung, was direkt auf die Existenz des schwachen neutralen Stromes hindeutet.

Die W-Bosonen sind elektrisch geladen und koppeln an den geladenen Strom (CC für „charged current“). Das Neutrino bzw. das Antineutrino im Endzustand kann im Detektor nicht direkt nachgewiesen werden, sondern manifestiert sich durch den im Ereignis fehlenden Transversalimpuls. Die Wirkungsquerschnitte für die Reaktionen  $e^+p \rightarrow \bar{\nu} + X$  und  $e^-p \rightarrow \nu + X$  (Abb. 20 rechts) sind verschieden, da das  $W^-$  hauptsächlich an das u-Quark koppelt während das  $W^+$  bevorzugt an das d-Quark koppelt und zusätzlich die Ankopplung des  $W^+$  durch die Händigkeit des Antineutrinos stark unterdrückt ist. Bei Werten von  $Q^2$  um 10 000  $\text{GeV}^2$  übersteigt der  $e^-p$ - den  $e^+p$ -Wirkungsquerschnitt um fast eine Größenordnung.

Im Vergleich der differentiellen Wirkungsquerschnitte für geladene und neutrale Ströme in  $e^+p$ - und  $e^-p$ -Wechselwirkungen sieht man, dass bei niedrigen  $Q^2$  der Photon-Austausch, das heißt der elektromagnetische Strom, dominiert. Mit steigendem  $Q^2$  wachsen die relativen Beiträge der schwachen Ströme. Bei hohen  $Q^2$  sind die Wirkungsquerschnitte für neutrale und geladene Ströme etwa gleich, was die Vereinigung der schwachen und elektromagnetischen Kräfte demonstriert.

Während die geladenen Vektorbosonen  $W^\pm$  bei CERN und Fermilab direkt in ihren Zerfällen beobachtet werden, kann erst bei HERA der Einfluss der Masse des W-Austauschteilchens, also der Propagator-Masse, auf den Wirkungsquerschnitt der schwachen Wechselwirkung direkt beobachtet werden. Der  $Q^2$ -Abfall des CC-Wirkungsquerschnitts hängt primär von der Masse  $M_{W_p}$  des W-Austauschteilchens ab,  $d\sigma/dQ^2 \propto (M_{W_p}^2/(M_{W_p}^2 + Q^2))^2$ . Wenn man die im Myon-Zerfall präzise gemessene Kopplungskonstante benutzt, kann man aus der Form des Wirkungsquerschnitts die Propagator-Masse bestimmen:

$$M_{W_p} = 81.4_{-2.6}^{+2.7}(\text{stat}) \pm 2.0(\text{sys})_{-3.0}^{+3.3}(\text{pdf}) \text{ GeV}.$$

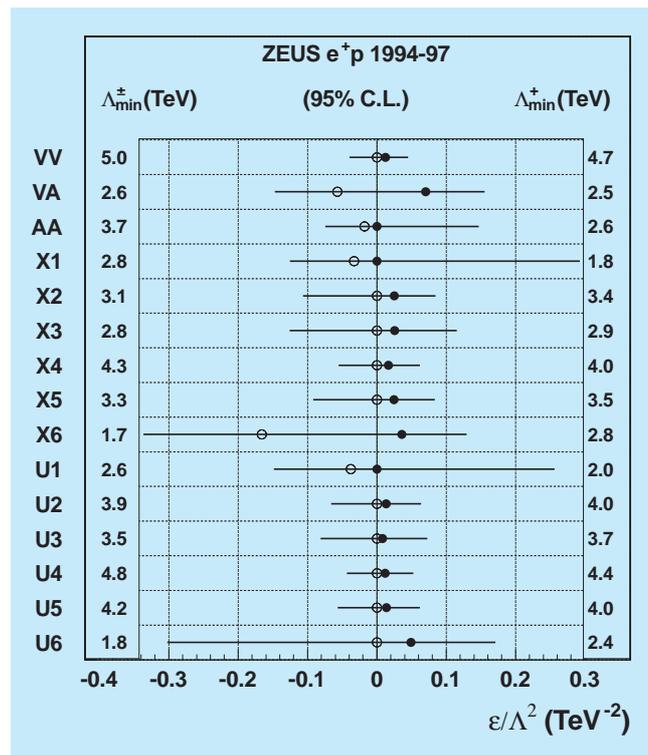


Abbildung 21: In der rechten bzw. linken Spalte sind die Massenskalen  $\Lambda$  gezeigt, bis zu denen Kontakt-Wechselwirkungen in  $e^+p$ -Streuung mit  $\epsilon = +1$  bzw.  $\epsilon = -1$  für die unterschiedlichen Typen von Wechselwirkungen (Helizität, Quark-Flavor-Kopplungen) ausgeschlossen werden können. Die Punkte stellen die wahrscheinlichsten Werte für  $\epsilon/\Lambda^2$  dar, die alle mit dem Standard-Modell-Wert von  $\epsilon/\Lambda^2 = 0$  kompatibel sind.

Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit dem Wert der Masse des W-Bosons aus der direkten Beobachtung der W-Zerfälle,  $M_W = 80.41 \pm 0.10 \text{ GeV}$ . Bei HERA wurde die W-Masse im raumartigen W-Austausch bestimmt. Diese Messung ist daher komplementär zu den Messungen in der zeitartigen W-Produktion in der  $p\bar{p}$  oder  $e^+e^-$ -Annihilation. Damit zeigt dieses wichtige Ergebnis die Konsistenz des Standard-Modells.

### Suche nach Abweichungen vom Standard-Modell

Abbildung 20 zeigt die gute Übereinstimmung der Vorhersagen des Standard-Modells mit den bei HERA gemessenen Wirkungsquerschnitten. Dies erlaubt es, eine Reihe von Phänomenen auszuschließen, die nicht im Standard-Modell vorhanden sind. HERA-Daten sind besonders geeignet, nach der Existenz von Leptoquarks zu suchen, da sie in der Elektron-Quark-Streuung direkt resonant erzeugt würden. Man würde dann eine Anhäufung in der Verteilung der invarianten Masse des Endzustands beobachten. Die ZEUS-Kollaboration hat

in  $e^+$ - und  $e^-$ -Daten in NC- und CC-Signaturen solche Elektron-Quark-Resonanzen gesucht. Aus der Tatsache, dass solche Signale nicht beobachtet wurden, kann man Leptoquarks bei einer Kopplungsstärke  $\lambda = 0.3$  mit Massen zwischen 150 und 280 GeV ausschließen.

ZEUS-Daten sind auch sensitiv auf neue Physik bei Energieskalen jenseits der HERA-Schwerpunktsenergie. Man fasst die Auswirkungen von solchen hypothetischen Prozessen als effektive Theorie der Kontakt-Wechselwirkungen („Contact Interactions“) zusammen. Die Form des Wirkungsquerschnitts bei hohen  $Q^2$  würde dadurch modifiziert. Die ZEUS-Kollaboration hat nach verschiedenen Arten von Kontakt-Wechselwirkungen gesucht. Da in den differentiellen Wirkungsquerschnitten bisher keine signifikanten Abweichungen von den Vorhersagen des Standard-Modells gefunden wurden, konnte eine Vielzahl von Ausschlussgrenzen von effektiven Massenparametern  $\Lambda$  gesetzt werden. Diese sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Ergebnisse sind von vergleichbarer Aussagekraft und zum Teil komplementär zu jenen, die an anderen Beschleuniger-Experimenten gefunden worden sind.

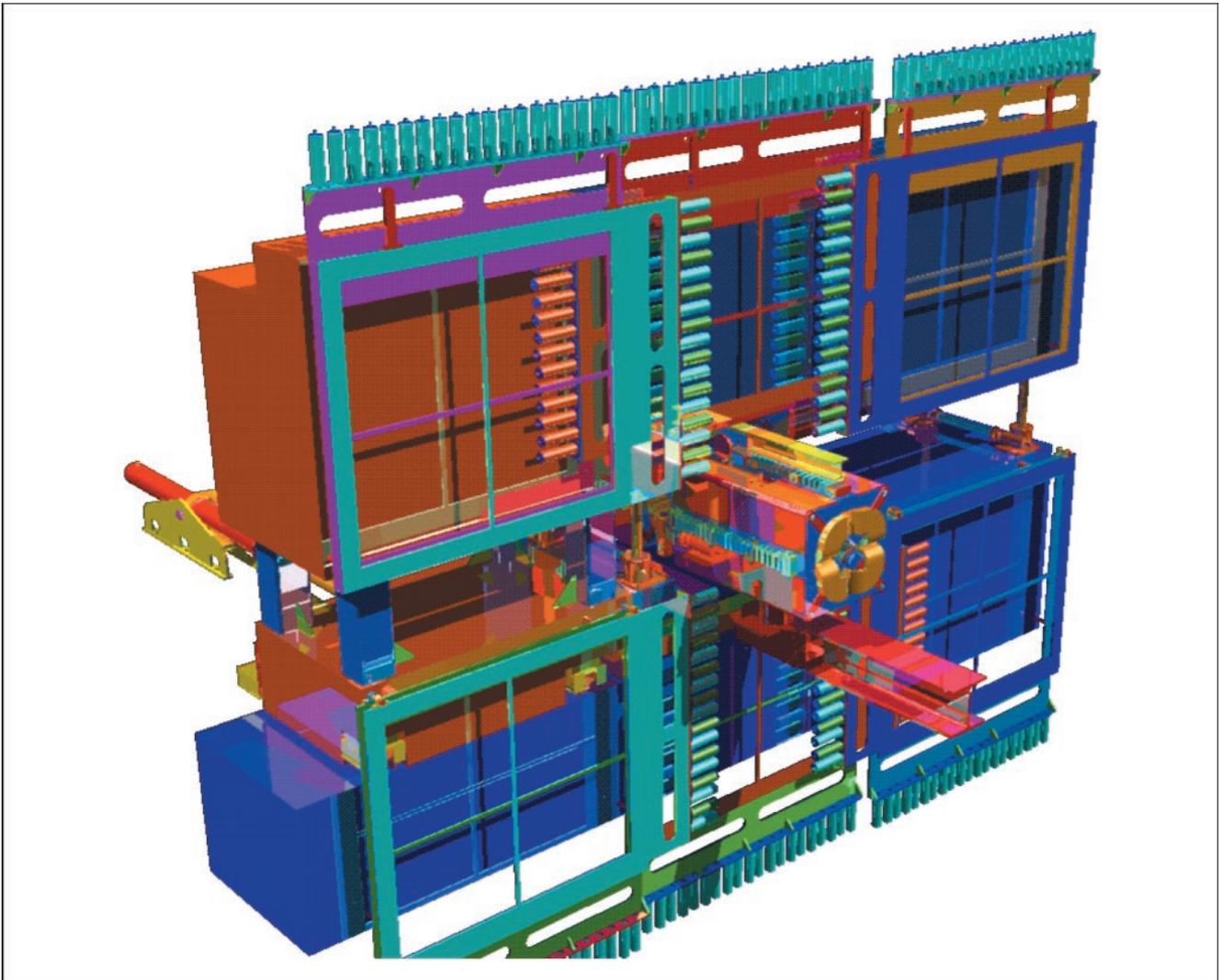


Abbildung 22: Blick auf die HERMES Eisen/Szintillator-Wand zur Identifikation von hoch-energetischen Myonen. Im Zentrum erkennt man einen der beiden HERA-Quadrupole, in die die Driftkammern des FQS-Detektors installiert sind. Zur Vereinfachung der Darstellung sind nur die Rahmen und nicht die einzelnen Szintillator-Paddel gezeigt.

# 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. of 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 Tech. Univ., Univ. of Illinois Urbana-Champaign, Simon Fraser Univ. und TRIUMF Vancouver, Yerevan Phys. Inst., DESY Zeuthen.

**Sprecher:** E. Kinney, Univ. of Colorado (bis Juni 1999); E. Steffens, Univ. Erlangen-Nürnberg (ab Juli 1999)

Im Jahr 1999 wurde der Betrieb mit dem longitudinal polarisierten Deuterium-Target fortgesetzt und etwa 2.3 Millionen Daten mit dem im HERMES Bereich longitudinal polarisierten Elektronen-Strahl (bzw. Positronen-Strahl nach der Umstellung im Sommer) aufgezeichnet. Ein Deuteriumkern enthält neben einem Proton auch ein Neutron und somit erlauben die Deuterium-Daten, zusammen mit dem entsprechenden Datensatz aus den Jahren 1996/97 an longitudinal polarisiertem Wasserstoff, einen experimentellen Zugang zur Untersuchung der longitudinalen Spin-Struktur des Nukleons.

Daneben wurden auch Daten bei höherer Dichte mit den unpolarisierten Targetgasen Deuterium, Stickstoff und Krypton genommen mit dem Ziel, kernabhängige Effekte in den Streuprozessen aufzudecken. Die Datennahme mit Krypton erfolgte in einer dreitägigen, speziell für HERMES ausgelegten Messperiode bei sehr hoher Targetdichte und damit verbundenen niedrigen Strahllebensdauern von etwa fünf Stunden und erbrachte fast eine Million Ereignisse.

Im Anschluss an den siebenwöchigen Shutdown im Frühjahr wurde ein erster Test mit dem transversal polarisierten Wasserstoff-Target durchgeführt. Mit diesem Target sollen zu einem späteren Zeitpunkt weitere Aspekte der Spin-Struktur des Nukleons, wie die transversalen Spinverteilungen der Quarks im Nukleon, untersucht werden. Bei den Testmessungen zeigte sich, dass auch bei einem auf

etwa 50% reduzierten Haltefeld noch ein guter Arbeitspunkt zwischen den depolarisierenden Resonanzen existiert und dass das Target in diesem Modus bei ausreichender Target-Polarisation betrieben werden kann.

Die vielfältigen Versuche, über eine Verkleinerung der lateralen Abmessungen der Targetzelle den „Stauereffekt“ zu erhöhen und damit die Luminosität des Experiments zu steigern, waren Ende 1999 von Erfolg gekrönt. Eine solche verkleinerte Zelle lieferte bei gleicher Polarisation eine um 50% erhöhte Dichte. Damit kann die zum Ende der 2000er Datennahme genommene Datenmenge signifikant gesteigert werden.

Die 1998 installierten Detektor-Erweiterungen, wie der Zweifach-RICH und die Myon-Wand (Abb. 22), wurden routinemäßig betrieben und in die Datennahme integriert. Damit konnte der Impulsbereich der identifizierbaren Teilchen erheblich erweitert werden und umfasst nun neben dem gestreuten Elektron (bzw. Positron) auch Myonen, geladene Pionen, Kaonen und Protonen im gesamten kinematischen Bereich des Experiments.

Auch 1999 lag der Schwerpunkt der Analyse auf den Daten der Jahre 1996 und 1997 mit dem polarisierten Wasserstoff-Target. Eine Reihe von Ergebnissen konnte im Berichtsjahr als Publikationen eingereicht werden. Hier ist besonders die Doppel-Spin-Asymmetrie in der Produktion von Hadron-Paaren

mit hohem Transversalimpuls zu nennen, welche sensitiv auf Photon-Gluon-Fusion ist und als erste Messung des Gluon-Beitrags zum Spin des Nukleons interpretiert werden kann. Von großem Interesse ist auch die experimentell erstmalig gefundene azimutale Einzel-Spin-Asymmetrie für positive Pionen bezüglich der Lepton-Streuebene. Sie gibt erste Hinweise auf die Möglichkeiten, die bisher unbekannte transversale Spin-Komponente des Nukleons experimentell zu untersuchen. Solche Messungen sind für den Betrieb nach dem langen Shutdown mit einem transversal polarisierten Target geplant.

Die Auswertung von Daten an unpolarisierten Targetgasen hoher Dichte führte ebenfalls zu unerwarteten Resultaten im Zusammenhang mit der Frage, ob elementare Reaktionen am Nukleon davon abhängen, ob das Nukleon frei oder in einem Kern der Masse  $A$  eingebaut ist. So zeigt das Verhältnis  $R$  des longitudinalen zum transversalen Absorptionsquerschnitt des virtuellen Photons bei kleinem  $x$  und  $Q^2$  einen starken Unterschied für Stickstoff im Vergleich zu Deuterium.

## Datennahme 1999

HERA wurde im Berichtsjahr ohne lange Betriebspausen betrieben. Neben kurzen Unterbrechungen zum Jahreswechsel wurde in einem siebenwöchigen Shutdown im Frühjahr von Elektronen auf Positronen umgestellt. Gute Daten mit hoher Polarisation (Abb. 23) wurden in den Perioden Februar bis April (Elektronen) und August bis Dezember (Positronen) gewonnen, die insgesamt etwa 2.3 Millionen rekonstruierte

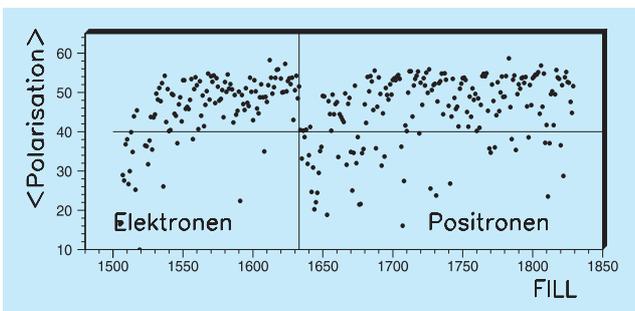


Abbildung 23: Die mittlere Strahlpolarisation pro Füllung im Jahr 1999.

Ereignisse der tiefunelastischen Streuung (DIS) ergaben. Der Targetbetrieb mit Deuterium wurde fortgesetzt. Targetstudien parallel zum Messbetrieb führten zu einer zusätzlichen Reduktion des von der Molekulpolarisation herrührenden systematischen Fehlers verglichen mit Wasserstoff. Im Anschluss an die Betriebspause im Frühjahr wurden Kammer und Magnet des transversalen Targets eingebaut und zum ersten Mal mit Strahl getestet. Wegen der starken Synchrotronstrahlung mit transversalem Feld muss das Haltefeld gegenüber dem longitudinalen Target um einen Faktor 2 auf etwa 155 mT reduziert werden. Die Tests haben ergeben, dass das Wasserstoff-Target ohne signifikante Depolarisation durch den Strahl betrieben werden kann, aber der geringe Entkopplungsgrad führt zu deutlichen Verlusten durch Spin-Austausch und Wandstöße, so dass mit einer Polarisation für Wasserstoff von nur etwa 0.7 gerechnet werden kann. Weitere Tests bezogen sich auf die Targetzelle, ein dünnwandiges elliptisches Rohr, in dem das aufgestaute Targetgas vom Elektronen-Strahl durchsetzt wird. Es wurde untersucht, ob sich der Querschnitt der Zelle gegenüber der ursprünglichen Auslegung verkleinern und damit der Stauereffekt erhöhen lässt. Beim zweiten Versuch Anfang Dezember wurde eine „mittelgroße“ Zelle im Strahl getestet. Bei unveränderter Polarisation und Untergrund ergab sich eine um 50% erhöhte Dichte. Eine weitere Verbesserung im 10–20%-Bereich zeichnet sich aufgrund der Ergebnisse des in der Weihnachtspause neuinstallierten Dissoziators ab. Zusammen mit der signifikanten Steigerung der injizierten Positronen-Ströme ist für den Messbetrieb 2000 mit um einen Faktor 2–3 höheren Ereignisraten zu rechnen. Neben polarisiertem Deuterium wurden auch unpolarisierte Targetgase verwendet. Besonders hohe Ereignisraten wurden Anfang Oktober in einem dreitägigen, dedizierten HERMES-Betrieb mit Krypton erreicht, wobei die Strahl-Lebensdauer auf etwa fünf Stunden reduziert wurde. Mit zehn Positronen-Füllungen wurden fast eine Million Krypton-Ereignisse aufgenommen, deren Messung im Parallelbetrieb eine etwa 20 mal längere Zeit erfordert hätte.

Wie in den letzten beiden Jahren wurde auch 1999 die Strahl-Polarisation simultan mit den beiden Polarimetern verfolgt. Da nach dem großen Umbau 2000/2001 auch H1 und ZEUS mit polarisierten Leptonen messen werden, wird eine enge Kooperation aller drei Experimente im Rahmen der POL2000-Initiative angestrebt.

In diesem Zusammenhang wurden bereits am transversalen Polarimeter (TPOL) Tests mit der modernisierten Ausleseelektronik durchgeführt.

Durch zahlreiche Studien mit dem longitudinalen Polarimeter (LPOL), welches direkt die longitudinale Polarisation zwischen den HERMES-Spinrotatoren nachweist, konnte der Grund für die Diskrepanz zwischen gemessenem und erwartetem Eichfaktor geklärt werden. Damit ist das ursprüngliche Ziel zweier unabhängiger Polarimeter erreicht.

Das HERMES-Spektrometer lief auch 1999 mit großer Zuverlässigkeit und hoher Effizienz (ungefähr 95%). Bis zum Shutdown im Frühjahr lag für die neuen Detektorkomponenten RICH und Myon-Wand der Schwerpunkt darauf, die noch offenen Probleme in Teilchen-Rekonstruktion, Kalibrierung und Auswertesoftware zu lösen. Nach dem Shutdown wurde dann die zweite Phase des „Charm-Upgrades“ mit dem Einbau der Weitwinkel-Hodoskope abgeschlossen. Dabei handelt es sich um zwei Szintillatorflächen jeweils in der oberen und unteren Spektrometerhälfte vor und hinter dem Spektrometer-Magneten. Diese Anordnung gibt zwei zusätzliche Raumpunkte zur Myon-Identifikation in einer vergrößerten Akzeptanz ( $140 \text{ mrad} < \Theta_y < 270 \text{ mrad}$ ).

## Physikalische Ergebnisse

Im Berichtsjahr konnte wie im Vorjahr eine Reihe von Analysen der Daten am polarisierten Wasserstoff der Jahre 1996/97 und an  $^3\text{He}$  aus dem ersten Betriebsjahr 1995 vorläufig abgeschlossen und veröffentlicht werden. Weiterhin waren die an unpolarisierten Targets genommenen Daten Gegenstand zahlreicher Analysen. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser Ergebnisse vorgestellt.

### Messungen an polarisierten Targets

Während man sich direkt nach der Entdeckung der Quarks im einfachen Quark-Parton-Modell vorstellte, dass sich der Spin des Nukleons allein aus dem Spin der drei Valenz-Quarks zusammensetzt, wusste man spätestens nach den Messungen des EMC-Experiments am

CERN, dass zusätzliche Beiträge berücksichtigt werden müssen. In Frage kommen hierzu Beiträge der See-Quarks, der Gluonen und der Bahndrehimpulse der Quarks und Gluonen. Inklusive Messungen der Spin-Experimente am CERN, SLAC und DESY bestimmten bisher mit hoher Genauigkeit nur den integralen Beitrag der Quarks zum Nukleonen-Spin. Die Beiträge von Gluonen und Bahndrehimpulsen müssen noch mit ausreichender Genauigkeit nachgewiesen werden. Vorrangiges Ziel des HERMES-Experiments ist es, die unterschiedlichen Beiträge zum Nukleonen-Spin mit hoher Präzision separat zu extrahieren.

### Polarisierte Quark-Verteilungen

Was die Quarks betrifft, sind besonders die Beiträge der einzelnen Quark-Sorten („quark flavours“) zum Nukleonen-Spin von Interesse. Neben der Analyse inklusiver Daten hat die HERMES-Kollaboration deshalb die Auswertung semiinklusive Messungen fortgesetzt und Doppel-Spin-Asymmetrien

$$A_{\parallel} = \frac{\sigma_{\leftarrow\leftarrow}^{\rightarrow} - \sigma_{\rightarrow\rightarrow}^{\rightarrow}}{\sigma_{\leftarrow\leftarrow}^{\rightarrow} + \sigma_{\rightarrow\rightarrow}^{\rightarrow}}$$

für die Erzeugung positiv und negativ geladener Hadronen bestimmt. Um die polarisierten Parton-Verteilungen von up-, down- und See-Quarks zu extrahieren und damit deren Beitrag zum Spin des Nukleons zu bestimmen, wurden polarisierte Daten an Wasserstoff – einem Protonen-Target mit hoher up-Quark-Dichte – und an  $^3\text{He}$  – einem Neutronen-Target mit erhöhter down-Quark-Dichte – im kinematischen Bereich  $0.023 < x < 0.6$  und  $1 < Q^2 < 10 \text{ GeV}^2$  verwendet. Die Variable  $x$  ist die sogenannte Bjorkensche Skalenvariable, die den Impulsanteil des gestreuten Partons im Nukleon darstellt, und  $Q^2$  die invariante Masse des virtuellen Photons.

Das Ergebnis der Analyse zeigt Abbildung 24. Während die Polarisation der up-Quarks positiv und die der down-Quarks negativ ist, zeigen die See-Quarks keine signifikante Polarisation. Dabei wurde angenommen, dass die Polarisation der einzelnen See-Quarksorten gleich ist („flavour symmetric sea“). Im SMC-Experiment am CERN wurden ähnliche Resultate erzielt, jedoch bei einer anderen Annahme über das Verhältnis

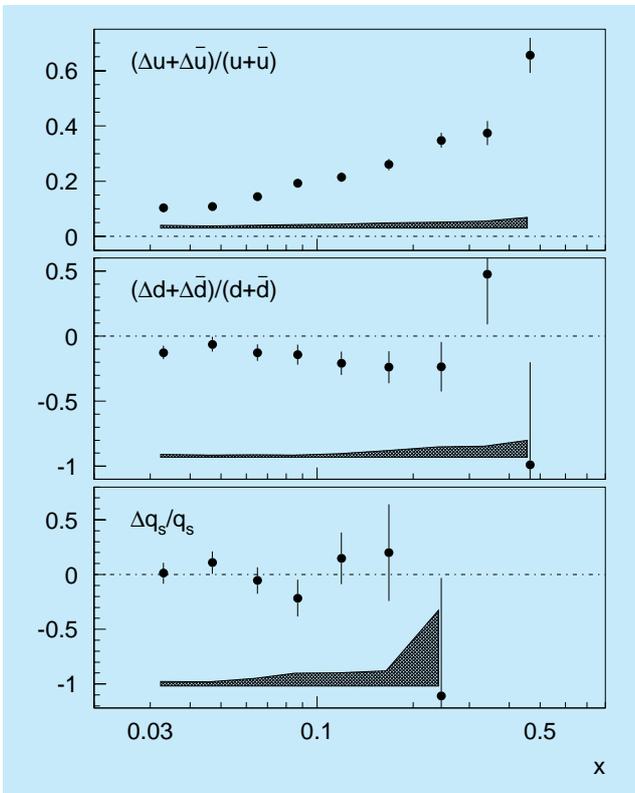


Abbildung 24: Die polarisierten Quark-Verteilungen für up-, down- und See-Quarks im Nukleon als Funktion des Parton-Impulsanteils  $x$  aus den Daten 1995–1997. Die schraffierte Fläche zeigt den Beitrag des systematischen Fehlers zum Gesamtfehler. Die Fehlerbalken zeigen allein den statistischen Fehler.

der See-Quark-Polarisationen. Eine Entscheidung über die Polarisation der strange See-Quarks, eine der offenen Fragen der Spin-Physik, kann nur eine direkte Messung herbeiführen, für die beim HERMES-Experiment durch die Inbetriebnahme des RICH („Ring Imaging Cherenkov Counter“) im Jahr 1998 die Voraussetzungen geschaffen worden sind. Die integralen Beiträge der einzelnen Quark-Sorten zum Spin des Nukleons sind im Rahmen ihrer Fehler mit den theoretischen Vorhersagen im Einklang.

## Polarisation der Gluonen

Große Anstrengungen werden gegenwärtig unternommen, die Polarisation der Gluonen und damit deren

Beitrag zum Spin des Nukleons zu messen. Alle existierenden und teilweise sehr präzisen inklusiven und semiinklusive Daten der tiefunelastischen Streuung haben einen Beitrag der Quarks zum Spin der Nukleonen von nur 20–40% ergeben. Der Rest könnte durch einen positiven Beitrag der Gluonen erklärt werden. Mit Hilfe von Prozessen, die über Photon-Gluon-Fusion (PGF) ablaufen, bei der das virtuelle Photon mit einem Quark, das von einem Gluon im Nukleon abgestrahlt wird, wechselwirkt, ist ein direkter Zugang zur Gluon-Polarisation möglich. Ein solcher Prozess ist die Erzeugung von Hadron-Paaren mit entgegengesetzter Ladung und hohen Transversalimpulsen. Diese experimentelle Signatur wurde beim HERMES-Experiment untersucht und erlaubt erstmals eine positive Aussage über die Gluon-Polarisation. Aus den polarisierten Wasserstoffdaten der Jahre 1996 und 1997 wurde die Doppel-Spin-Asymmetrie derartiger Paare in Abhängigkeit von den transversalen Impulsen der beiden Hadronen,  $p_T^{h_1}$  und  $p_T^{h_2}$ , bestimmt. Für Hadron-Paare ( $h_1 h_2$ ) mit  $p_T^{h_1} > 1.5$  GeV und  $p_T^{h_2} > 1.0$  GeV beträgt die gemessene Asymmetrie

$$A_{\parallel} = -0.28 \pm 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.02 \text{ (syst)} .$$

Um diese Asymmetrie interpretieren zu können, müssen Beiträge von tiefunelastischer Streuung, Vektormeson-Dominanz-Prozessen und den beiden direkten QCD-Prozessen, Photon-Gluon-Fusion und QCD-Comptonstreuung, berücksichtigt werden. Die relativen Beiträge zum Wirkungsquerschnitt wurden mit Hilfe des PYTHIA Monte Carlo-Programms abgeschätzt. Innerhalb dieses Modells ergibt sich nur für den PGF-Prozess bei einer positiven Gluon-Polarisation  $\Delta G/G$  ein negativer Wert für die Asymmetrie  $A_{\parallel}$ . Dagegen resultiert aus der QCD-Comptonstreuung eine positive Asymmetrie, und die Asymmetrie der anderen Subprozesse ist Null. Die so extrahierte Gluon-Polarisation

$$\Delta G/G = 0.41 \pm 0.18 \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (syst)}$$

ist in Abbildung 25 mit verschiedenen phänomenologischen QCD-Voraussagen in erster Ordnung der Konstanten der starken Wechselwirkung verglichen. Das quantitative Resultat hängt kritisch vom genauen Verständnis der einzelnen Subprozesse ab. Jedoch ist die Schlussfolgerung einer positiven Gluon-Polarisation davon nicht betroffen.

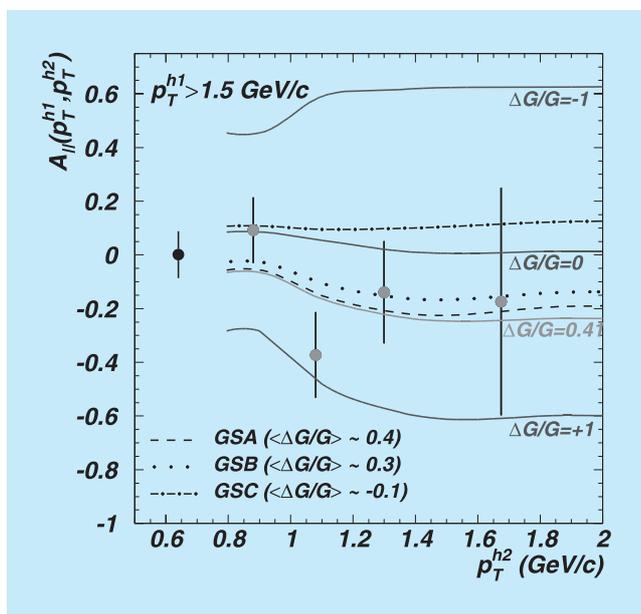


Abbildung 25: Die longitudinale Asymmetrie  $A_{||}$  (Punkte mit statistischen Fehlern) für Hadron-Paare mit hohem Transversalimpuls  $p_T^{h_i}$ , verglichen mit PYTHIA Monte Carlo-Voraussagen für  $\Delta G/G$  und phenomenologischen QCD-Fits führender Ordnung.

### Einfach-Spin-Asymmetrien

Ein nächster Schritt im Verständnis polarisierter tief-unelastischer Streuung ist die Untersuchung transversal polarisierter Nukleonen. Transversale Spin-Asymmetrien in hadronischen Reaktionen können mit „time-reversal-odd“ Verteilungsfunktionen (Sivers Mechanismus) oder „time-reversal-odd“ Fragmentationsfunktionen (Collins Mechanismus) erklärt werden. Das SMC-Experiment hat kürzlich die erste Messung von semiinklusive Hadron-Produktion in tiefunelastischer Streuung an einem transversal polarisierten Target vorgestellt. Die Hadron-Produktion wurde in Bezug auf den Collins-Winkel analysiert, und für positive Hadronen wurde eine von Null verschiedene Asymmetrie  $A_N = (11 \pm 6)\%$  gefunden. Die Asymmetrie für negative Hadronen ist  $A_N = (-2 \pm 6)\%$ .

Die HERMES-Kollaboration hat im Berichtsjahr ein Ergebnis zu einer ähnlichen Variablen zur Veröffentlichung eingereicht. Es wurde die Asymmetrie für Hadron-Produktion an einem longitudinal polarisierten Target gemessen. Für diesen Fall erwartet man

eine Asymmetrie in Abhängigkeit vom Azimutalwinkel zwischen der Ebene, die vom produzierten Pion ( $\vec{P}_h$ ) und dem virtuellen Photon aufgespannt wird, und der Ebene, die vom einfallenden ( $\vec{k}$ ) und gestreuten Lepton ( $\vec{k}'$ ) aufgespannt wird und damit das virtuelle Photon (Impuls  $q$ ) enthält (Abb. 26).

Abbildung 27 zeigt die Einfach-Spin-Asymmetrie als Funktion des Azimutalwinkels  $\phi$  für positive und negative Pionen. Eine Anpassung mit einer Sinusfunktion gibt eine positive Asymmetrie von  $A_N = (2.0 \pm 0.4)\%$  für positiv und  $A_N = (-0.1 \pm 0.5)\%$  für negativ geladene Pionen.

Die Tatsache, dass eine signifikante Asymmetrie bereits mit einem longitudinal polarisierten Target gemessen werden konnte, ist sehr ermutigend für zukünftige Messungen von transversalen Spin-Effekten im Nukleon mit einem transversal polarisierten Target, wie sie von der HERMES-Kollaboration nach dem Shutdown geplant sind.

### Doppel-Spin-Asymmetrien in Vektormeson-Produktion

Zu einem überraschenden Ergebnis führte die Beobachtung von Doppel-Spin-Asymmetrien in  $J/\psi$  und exklusiver  $\phi$  und  $\rho$  Vektormeson-Produktion anhand

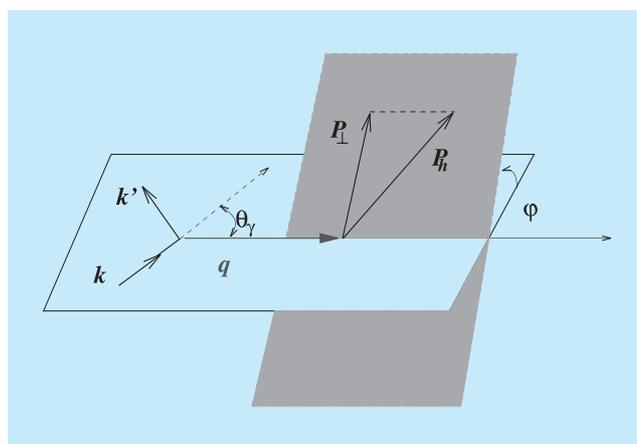


Abbildung 26: Kinematische Ebenen für Hadron-Produktion in semiinklusive tiefunelastischer Streuung.

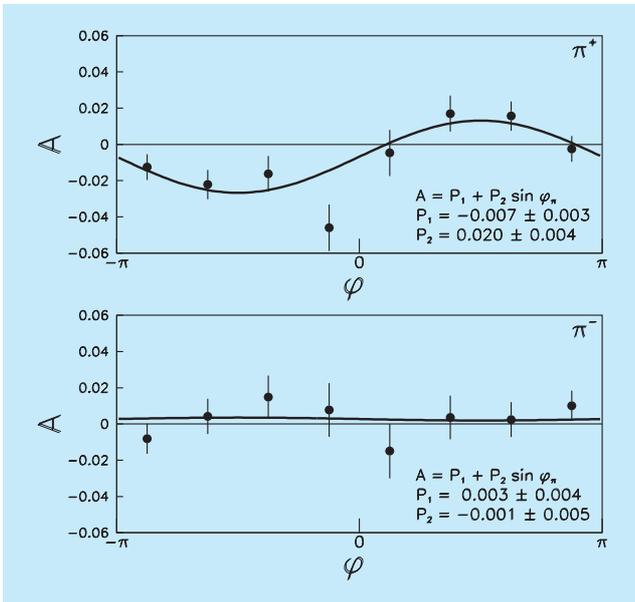


Abbildung 27: Die Einfach-Spin-Asymmetrie in Pion-Produktion an einem longitudinal polarisierten Target in Abhängigkeit vom Azimutalwinkel  $\varphi$ .

der HERMES-Daten der Jahre 1996 und 1997. Bisher sind keine Daten über Doppel-Spin-Asymmetrien in Vektormeson-Produktion in polarisierter Lepton-Nukleon Streuung verfügbar gewesen. Für die Analyse wurde der Asymmetrie-Formalismus aus der tiefunelastischen Lepton-Nukleon-Streuung adaptiert.

Wegen der größeren verfügbaren Statistik konzentrierte sich die Asymmetrie-Analyse auf das  $\rho$ -Meson. Eine signifikante positive Asymmetrie in exklusiver  $\rho$ -Produktion wurde beobachtet:

$$A_1^\rho = 0.30 \pm 0.11(\text{stat}) \pm 0.02(\text{syst/exp}) \pm 0.05(\text{syst}/A_2^\rho).$$

Der experimentelle systematische Fehler wird durch die Unsicherheit der Messungen von Strahl- und Target-Polarisation bestimmt. Eine weitere systematische Unsicherheit ist durch den Beitrag der bislang unbekannt transversalen Asymmetrie  $A_2^\rho$  verursacht. Die Spin-Asymmetrie des  $\rho$ -Mesons wurde in jeweils drei Intervallen verschiedener kinematischer Variablen untersucht. Abbildung 28 zeigt die Asymmetrie in Abhängigkeit von  $Q^2$ . Eine signifikante Abhängigkeit der Asymmetrie von einer dieser Variablen konnte nicht beobachtet werden.

Das theoretische Verständnis von Spin-Asymmetrien in Prozessen exklusiver Vektormeson-Produktion ist begrenzt. In Modellen basierend auf Regge-Theorie werden keine messbaren Spin-Effekte für ein longitudinal polarisiertes Target erwartet. In QCD-Modellen der exklusiven Vektormeson-Produktion, basierend auf Quark- und Gluon-Austausch, wird der diffraktive Prozess mit der internen (Spin-)Struktur des Nukleons in Verbindung gebracht. Nicht nur in Vektormeson-Produktion, sondern auch in anderen exklusiven Prozessen wie tiefunelastischer Comptonstreuung oder Produktion von pseudoskalaren Mesonen ist die Analyse von Spineffekten geeignet, zwischen Modellen der gegenwärtig diskutierten „off-forward“ Parton-Verteilungen zu unterscheiden.

Die Schwerpunktsenergie des HERMES-Experiments liegt in Regge-Theorie gestützten Modellen im Übergangsbereich vom Reggeon- zum Pomeron-Austausch bzw. in perturbativen QCD-Modellen im Übergangsbereich vom Quark- zum Gluon-Austausch. Um zwischen den verschiedenen Erzeugungsmechanismen definitiv

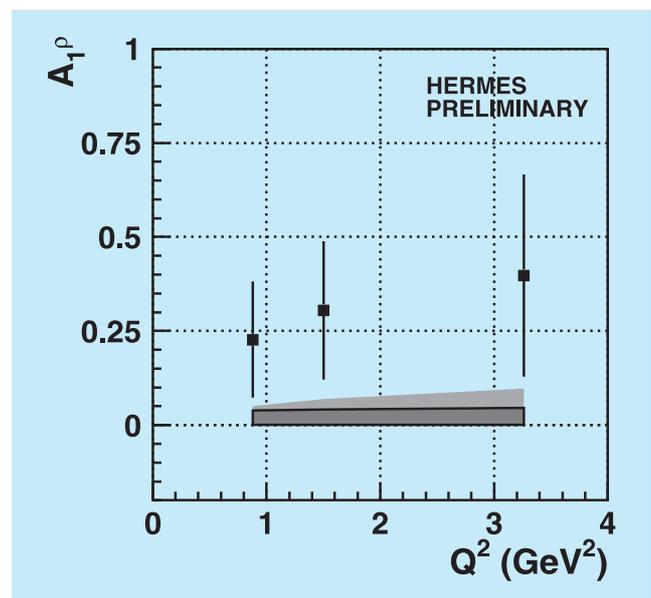


Abbildung 28: Die Doppel-Spin-Asymmetrie für  $\rho$ -Mesonen in Abhängigkeit von der kinematischen Variablen  $Q^2$ . Die dunkel schraffierte Fläche zeigt den Beitrag des experimentellen systematischen Fehlers und die hell schraffierte den zusätzlichen Beitrag aufgrund der Unkenntnis von  $A_2^\rho$ .

unterscheiden zu können, sind weitere Daten zu Spin-Asymmetrien in Vektormeson-Produktion notwendig, die einen großen kinematischen Bereich und insbesondere, wie bei HERMES, diesen Übergangsbereich überstreichen.

## Messungen an unpolarisierten Targets

### Massenabhängigkeit von R in tiefunelastischer Streuung

Die Änderung der inklusiven Strukturfunktion  $F_2(x)$  mit der Targetmasse  $A$  ist bei großen  $x$ -Bjorken als EMC-Effekt und bei kleinen  $x$  als Shadowing bekannt. Bisher wurde aber keine Massen-Abhängigkeit des Verhältnisses  $R$  des longitudinalen zum transversalen tiefunelastischen Wirkungsquerschnitt ( $\sigma_L/\sigma_T$ ) beobachtet. Allerdings waren alle bisherigen Messungen von  $R$  auf kinematische Bereiche mit relativ großem  $x$  und  $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$  begrenzt. In Abbildung 29 wird ersichtlich, dass die neuen HERMES-Daten an

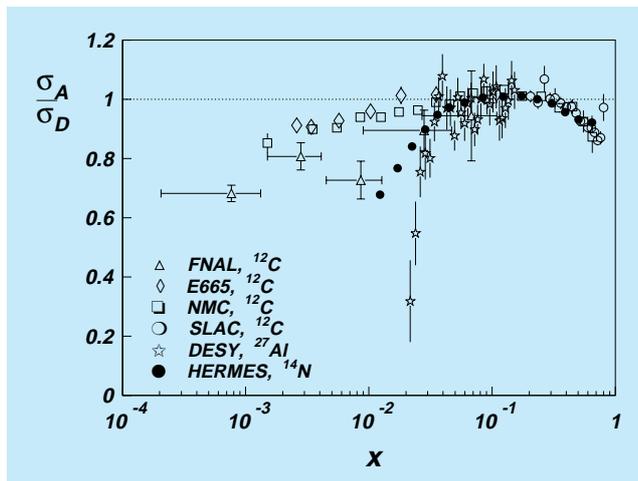


Abbildung 29: Das Verhältnis des inklusiven tiefunelastischen Streuwirkungsquerschnitts an Kernen  $A$  zu Deuterium  $D$  in Abhängigkeit von  $x$ . Die vollen Punkte zeigen die HERMES-Daten für  $^{14}\text{N}$ , die anderen Punkte zeigen die Daten von NMC, SLAC und E665 an  $^{12}\text{C}$  und von DESY an  $^{27}\text{Al}$ . Das horizontale Fehlerband zeigt den systematischen Fehler für die HERMES-Daten.

$^{14}\text{N}$  und Deuterium  $D$  signifikante Unterschiede zu den  $^{12}\text{C}$ -Daten von E665 und NMC bei kleinem  $x$  ( $< 0.06$ ) aufweisen, aber auch, dass sie in guter Übereinstimmung mit  $^{12}\text{C}$ -Daten vom SLAC bei großem  $x$  sind.

Die HERMES-Daten zeigen auch als Funktion von  $Q^2$  bei konstantem  $x$  in überlappenden  $(x, Q^2)$ -Bereiche eine Abweichung von den NMC/E665-Messungen. Diese Abweichung wird mit steigendem  $Q^2$  sogar noch größer. Der Unterschied zwischen den NMC- und E665-Daten auf der einen Seite und den HERMES-Daten auf der anderen Seite kann durch die sehr unterschiedlichen Strahlenergien der drei Experimente verstanden werden. Dies führt zu sehr unterschiedlichen Werten des Photon-Polarisationsfaktors  $\epsilon$ , der für NMC und E665 nahe 1 liegt und für HERMES zwischen 0.1 und 1.0 variiert. Der Einfluss der unterschiedlichen  $\epsilon$ -Werte ist am besten an dem Verhältnis der tiefunelastischen Wirkungsquerschnitte zu sehen:

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_D} = \frac{F_2^A(1 + \epsilon R_A)(1 + R_D)}{F_2^D(1 + R_A)(1 + \epsilon R_D)}.$$

Für  $\epsilon \rightarrow 1$  ist  $\sigma_A/\sigma_D$  gleich dem Verhältnis der Strukturfunktionen  $F_2^A/F_2^D$ , was erklärt, warum ein Unterschied zwischen  $R_A$  und  $R_D$  bei NMC und E665 nicht gemessen werden konnte. Für Daten mit  $\epsilon < 1$  ist es möglich, einen Wert für  $R_A/R_D$  durch Fitten der  $\epsilon$ -Abhängigkeit von  $\sigma_A/\sigma_D$  für einzelne  $(x, Q^2)$ -Bereiche zu extrahieren. Abbildung 30 zeigt die so erhaltenen Werte für  $R_A/R_D$ ; die gezeigten Fehlerbalken sind durch den systematischen Fehler in den Unsicherheiten der Strahlungskorrekturen dominiert. Für niedrige Werte in  $Q^2$  und  $x$  wurde eine starke Massenabhängigkeit von  $R$  beobachtet, die von  $^3\text{He}$  zu  $^{14}\text{N}$  zunimmt. Bei höheren Werten von  $Q^2$  und  $x$  sind die Daten von NMC an  $^4\text{He}$  und  $^{12}\text{C}$ , die mit der gleichen Methode wie die HERMES-Daten analysiert wurden, in Übereinstimmung mit früheren Messungen. Dieses völlig neue Resultat hat bereits großes theoretisches Interesse stimuliert, was hoffentlich bald zur einer befriedigenden Erklärung dieses Effekts führt.

## Fragmentationsfunktionen

Die große Akzeptanz des HERMES-Spektrometers macht es möglich, gleichzeitig mit dem gestreuten Elektron bzw. Positron auch Hadronen nachzuweisen. Mit

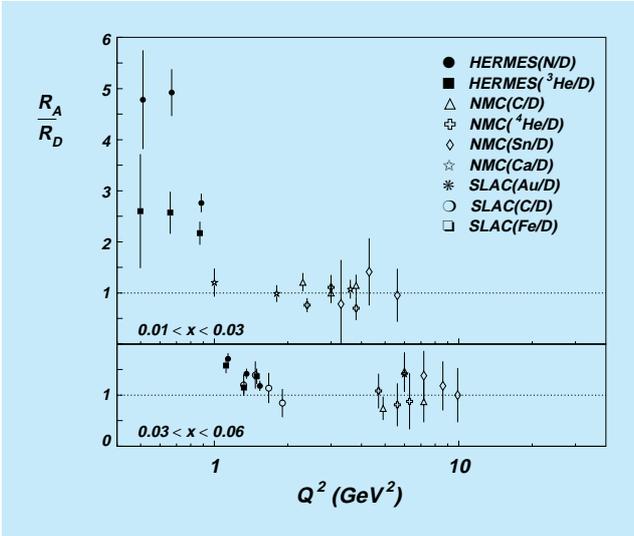


Abbildung 30: Das Verhältnis  $R_A/R_D$  (mit  $R = \sigma_L/\sigma_T$ ) für Kern  $A$  und Deuterium als Funktion von  $Q^2$  für zwei verschiedene Bereiche in  $x$ .

Hilfe des polarisierten Targets werden dadurch, wie bereits beschrieben, die einzelnen Beiträge der unterschiedlichen Quark-Sorten zum Nukleonen-Spin bestimmt. Mit unpolarisierten Targets kann dagegen der Prozess studiert werden, bei dem ein Quark, während es den Kern verlässt, in ein Hadron fragmentiert, ein elementarer Prozess der QCD. Der Fragmentationsprozess ist langreichweitig im Vergleich zur tiefunelastischen Streuung und ist damit in Störungstheorie nicht berechenbar. Jedoch kann die Fragmentation mit Modellen beschrieben werden, zum Beispiel kann die  $Q^2$ -Abhängigkeit der Fragmentationsfunktion  $D_q^h$  mit den DGLAP-Gleichungen vorausgesagt werden. Die Fragmentationsfunktion  $D_q^h$  gibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Quark der Sorte  $q$  zu einem Hadron des Typs  $h$  fragmentiert. Die relativ niedrige Strahlenergie von HERMES erlaubt es, die  $Q^2$ -Abhängigkeit der Fragmentationsfunktion bei niedrigen  $Q^2$  zu studieren. Weiterhin sind die Welt Daten für Hadron-Produktion bisher von  $e^+e^-$ - und  $p\bar{p}$ -Experimenten dominiert, bei denen nur mittlere Fragmentationsfunktionen wie  $D_u^{\pi^+} + D_d^{\pi^+}$  gemessen wurden. Da bisher nur wenige Daten aus der  $ep$  oder  $\mu p$ -Streuung existieren, aus denen die einzelnen  $D_q^h$  extrahiert werden können, kann das HERMES-Experiment dazu einen signifikanten Beitrag leisten.

Die HERMES-Kollaboration untersuchte die Produktion von geladenen und neutralen Pionen durch den 27 GeV Positronen-Strahl am Wasserstoff-Target. Geladene Pionen wurden mit dem Schwellen-Gas-Cherenkov-Zähler identifiziert. Neutrale Pionen wurden mit dem Bleiglas-Kalorimeter über den Zerfall  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  nachgewiesen. Die Daten werden als Verhältnis des semiinklusiven Wirkungsquerschnitts zum inklusiven tiefunelastischen Streuquerschnitt dargestellt:

$$\frac{1}{\sigma_{DIS}} \frac{d\sigma^\pi}{dz} \equiv \frac{d\sigma(ep \rightarrow e'\pi X)}{dx dQ^2 dz} \bigg/ \frac{d\sigma(ep \rightarrow e'X)}{dx dQ^2} = \frac{\sum_f e_f^2 q_f(x, Q^2) D_f^\pi(z, Q^2)}{\sum_f e_f^2 q_f(x, Q^2)},$$

und stellen im wesentlichen die Multiplizitätsverteilungen der erzeugten Pionen dar. Dabei steht  $z$  für das Verhältnis aus Hadron-Energie  $E_h$  und Photon-Energie  $\nu$ , und  $q_f$  für die unpolarisierten Quark-Verteilungen im Nukleon. Abbildung 31 zeigt die HERMES-Daten

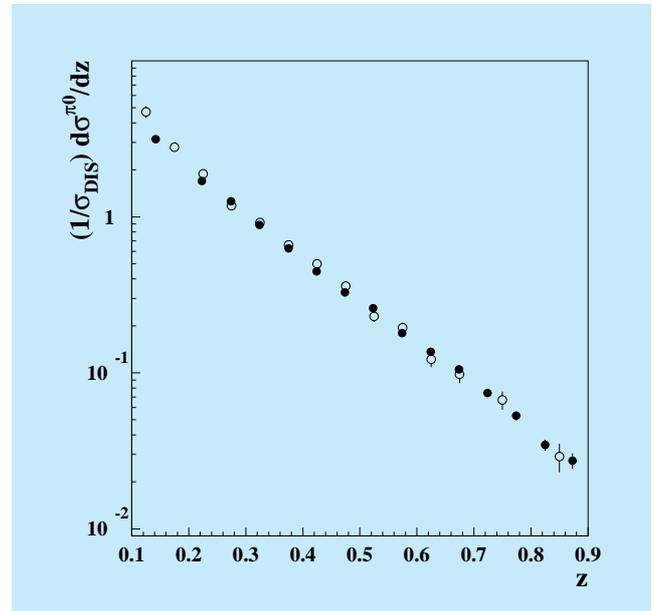


Abbildung 31: Vergleich der HERMES-Daten (volle Punkte) und der EMC-Daten (offene Punkte) zur  $\pi^0$ -Produktion. Die Daten wurden in NLO-QCD zum gleichen  $Q^2$  ( $25 \text{ GeV}^2$ ) entwickelt. Die Fehlerbalken sind rein statistisch, der systematische Fehler für HERMES ist  $\sim 9\%$  und für EMC  $< 14\%$ .

(volle Punkte) für  $\pi^0$ -Produktion im Vergleich zu den EMC-Daten (offene Punkte). Die HERMES-Daten wurden zum gleichen  $Q^2$  ( $25 \text{ GeV}^2$ ) wie die EMC-Daten mit einer „next-to-leading order“ (NLO) QCD-Evolution entwickelt. Die Übereinstimmung ist exzellent und legt nahe, dass die QCD-Modelle bis herunter zu HERMES-Energien verwendbar sind. Während dieses Resultat in sich selbst interessant ist, ist es auch wesentlich für die Interpretation der polarisierten Daten, weil es zeigt, dass QCD und die Parton-Modelle für die HERMES-Kinematik gültig sind.

Zusätzlich bestätigt die von HERMES auch gemessene, aber hier nicht gezeigte Übereinstimmung zwischen  $\pi^0$ -Produktions-Wirkungsquerschnitt ( $\frac{d\sigma^{\pi^0}}{dz}/\sigma_{\text{DIS}}$ ) und dem mittleren  $\pi^+$  und  $\pi^-$  Produktions-Wirkungsquerschnitt ( $\frac{d\sigma^{\pi^+}}{dz} + \frac{d\sigma^{\pi^-}}{dz}$ )/ $2\sigma_{\text{DIS}}$  die Erwartung von Isospin-Symmetrie im Fragmentationsprozess.

## Die Polarisation des $\Lambda/\bar{\Lambda}$ -Hyperons

Wegen der Paritätsverletzung im schwachen Zerfall des  $\Lambda$ -Hyperons kann die Winkelverteilung der Zerfallsprodukte verwendet werden, um die Polarisation des  $\Lambda$ -Hyperons zu bestimmen. Diese Methode wurde von der HERMES-Kollaboration genutzt, um zwei interessante Größen zu extrahieren.

Die erste ist die Messung des Polarisations-Transfers in tiefunelastischer Streuung von longitudinal polarisierten Elektronen auf das an unpolarisierten Targets erzeugte  $\Lambda$ -Hyperon. Dafür wurde eine  $\Lambda$ -Polarisation von  $P_\Lambda = 0.03 \pm 0.06$  (stat)  $\pm 0.03$  (syst) gemessen. Leider ist diese Messung noch nicht genau genug, um zwischen unterschiedlichen Vorhersagen zu unterscheiden. Das naive Quark-Modell, das eine Polarisation der strange-Quarks von 100% annimmt, sagt eine Polarisation von  $P_\Lambda = 0.018$  voraus, wohingegen ein Modell

von Jaffe mit  $SU(3)_f$ -Symmetrie, das auf den gemessenen Resultaten der Ellis-Jaffe-Summenregel beruht,  $P_\Lambda = -0.057$  voraussagt.

Die zweite, für die ein viel genaueres Ergebnis erzielt wurde, ist die transversale Polarisation des  $\Lambda$ -Hyperons in quasi-reeller Photoproduktion an unpolarisierten Targets ( $\gamma^*p \rightarrow \Lambda X$ ). Die Polarisation wurde bezüglich der Ebene senkrecht zur  $\Lambda$ -Produktionsebene gemessen. Abbildung 32 zeigt die Polarisation als Funktion des transversalen Impulses des  $\Lambda/\bar{\Lambda}$ -Hyperons. Für das  $\Lambda$ -Hyperon wird eine positive Polarisation beobachtet, die die Tendenz aufweist, mit wachsendem transversalen Impuls anzusteigen. Das  $\bar{\Lambda}$ -Hyperon dagegen zeigt eine negative Polarisation. Es gibt bisher keine klare Interpretation dieses Effekts, obwohl ähnliche Polarisationen bereits in Hadron-Kollisionsexperimenten gemessen wurden.

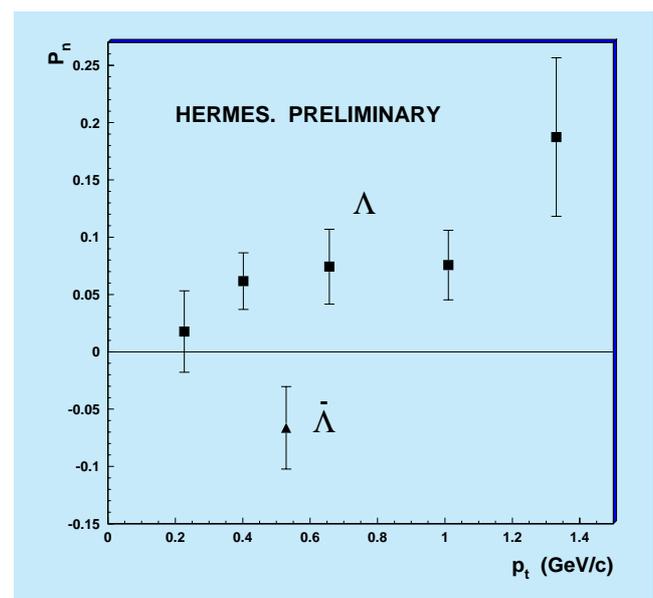


Abbildung 32: Die transversale Polarisation des  $\Lambda/\bar{\Lambda}$ -Hyperons in Abhängigkeit vom transversalen Impuls des Hyperons.

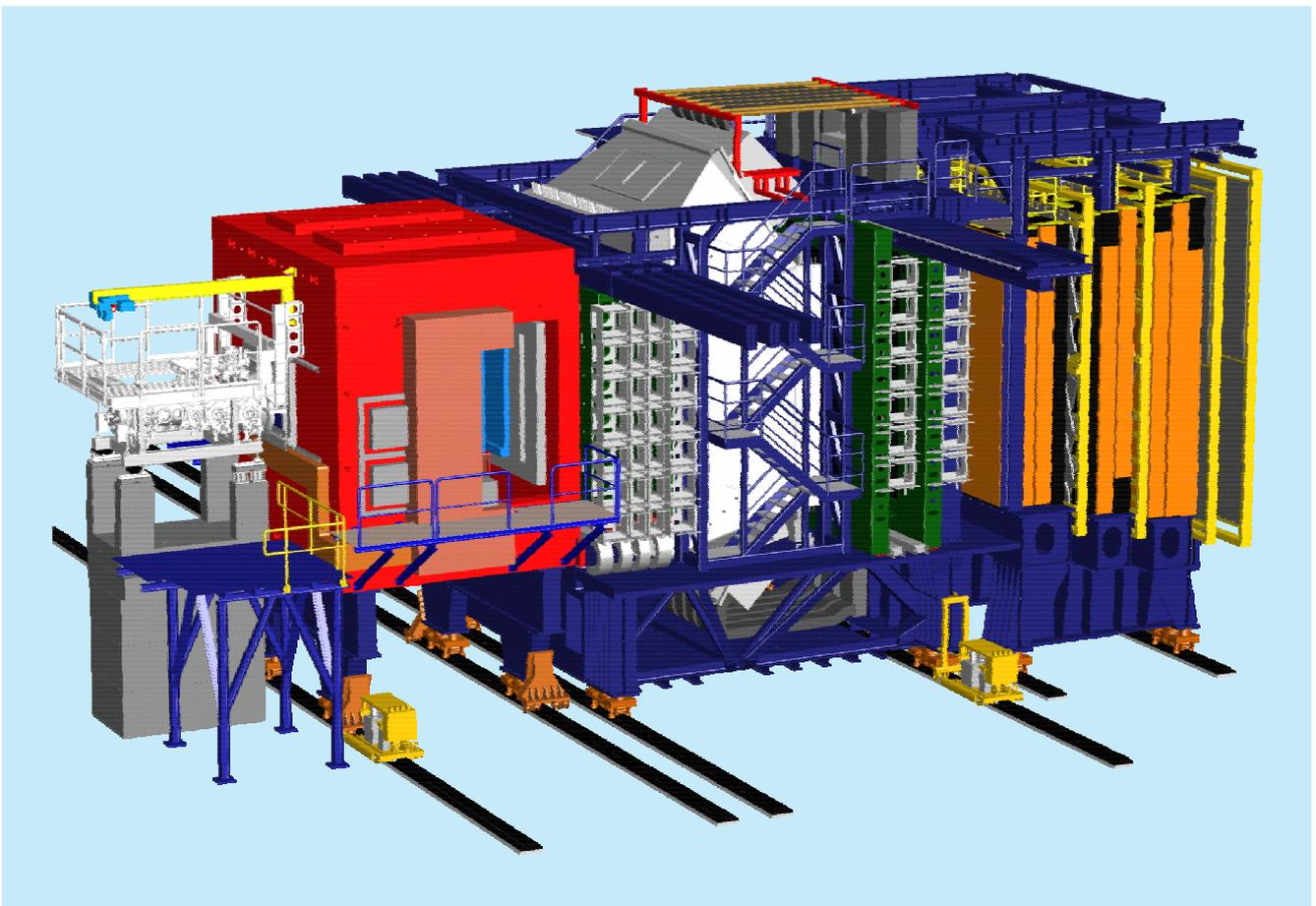


Abbildung 33: Der Detektor HERA-B. Von links nach rechts erkennt man, der Richtung der Protonen folgend, zunächst den konischen Vakuumtank für Target und Vertexdetektor. Darauf folgt der Magnet, dessen Eisenjoch fast würfelförmig ist. Innerhalb des Jochs und rechts davon befinden sich Spurkammern. Hinter dem Treppenaufgang befindet sich der RICH-Detektor, gefolgt von weiteren Spurkammern, dem elektromagnetischen Kalorimeter und den Myon-Kammern einschließlich Eisenabsorber.

# HERA-B Experiment

**Beteiligte Institute:** NIKHEF Amsterdam, Univ. Texas Austin, Univ. Barcelona, IHEP und Tsinghua Univ. Beijing, Humboldt Univ. Berlin, Univ. und INFN Bologna, Univ. Cincinnati, LIP und Univ. Coimbra, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, Northwestern Univ. Evanston, DESY und Univ. Hamburg, MPI Kernphys. und Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Univ. Ljubljana, UC Los Angeles, LIP und Univ. Lissabon, Univ. Mannheim, ITEP und MEPHI Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, PNPI St. Petersburg, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

**Sprecher:** A. Schwarz, DESY

Ziel des Experiments HERA-B ist die Untersuchung von Aspekten der Physik von Bottom- und Charm-Quarks. Die wichtigste Aufgabe ist die Messung der CP-Asymmetrie in den Zerfällen von B-Mesonen. Dies stellt einen fundamentalen Beitrag zum Verständnis des Standard-Modells der Hochenergiephysik dar und erlaubt es, nach möglichen Grenzen dieses Modells zu suchen. Weitere Untersuchungsgegenstände sind:

- Oszillationen zwischen  $B_s$ -Mesonen und ihren Antiteilchen  $\bar{B}_s$ ,
- seltene leptonische Zerfälle,
- Spektroskopie und Zerfälle von Bottom-Mesonen und -Baryonen,
- Produktion von schweren Quarks im Rahmen der Quantenchromodynamik.

Zu diesem Zweck werden Hadronen mit schweren Quarks durch Wechselwirkungen von Protonen des HERA-Protonenstrahls mit Drahttargets, die in die Randbereiche des Strahls eingeführt werden, erzeugt und in einem Vorwärtsspektrometer mit großer Akzeptanz nachgewiesen. Um die Bottom-Hadronen in einer für die signifikante Messung der Effekte der CP-Verletzung ausreichenden Menge zu produzieren, müssen pro Passieren eines Proton-Pakets (dies geschieht alle 96 nsec, also etwa 10 Millionen mal pro Sekunde) mehrere (etwa 4 bis 5)

Wechselwirkungen mit den Targetdrähten erreicht werden. Unter den vielen Wechselwirkungen sind nur sehr wenige, etwa eine unter einer Million, in denen Hadronen mit einem Bottom-Quark erzeugt werden. Die Rate an erzeugten Bottom-Hadronen beträgt daher etwa 40 pro Sekunde.

Die Anforderungen an das Vorwärtsspektrometer sind daher außerordentlich: alle Detektoren, speziell die Detektoren zur Spurrekonstruktion, müssen eine sehr hohe Strahlungsbelastung aushalten und auch bei Belegungsdichten bis zu 30% eine Spurrekonstruktion ermöglichen. Das Trigger- und Datennahmesystem muss eine extrem hohe Selektivität und Effizienz bieten, um die wenigen interessanten Ereignisse mit Bottom-Hadronen aus der enormen Zahl an Untergrund-Reaktionen herauszufiltern. Die Verhältnisse, denen sich das HERA-B Experiment gegenüber sieht, entsprechen weitgehend denen, die die großen Experimente am Large Hadron Collider (LHC) am CERN in einigen Jahren zu bewältigen haben werden.

Im Jahr 1999 durchlief das HERA-B Experiment eine entscheidende Phase. Auf allen kritischen Gebieten, wie Spurdetektoren im inneren und äußeren Bereich, Datennahmearchitektur, Triggerarchitektur, Datenrekonstruktion und -analyse, wurden entscheidende Durchbrüche erzielt. Durch eine Abfolge von monatlichen, zeitlich auf drei Tage begrenzten Zugängen zur HERA-Wechselwirkungszone konnte

das HERA-B Experiment sukzessive komplettiert werden. In den auf die Zugänge folgenden kurzen Datennahmeperioden wurden die jeweils installierten Detektorkomponenten in Betrieb genommen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das Experiment bis auf einige wenige Kammern des inneren Spurdetektorbereichs komplett installiert.

Die HERA-B Kollaboration bereitet sich nun auf die Datennahme vor mit dem Ziel, im Jahre 2000 genügend Daten für eine signifikante Messung der Verletzung der CP-Symmetrie in Zerfällen von Bottom-Hadronen zu akkumulieren.

## Der Detektor HERA-B

Der Detektor HERA-B ist schematisch in Abbildung 33 dargestellt. Er 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 Hauptspurkammer-system sowie die Komponenten für die Teilchen-Identifizierung „Ring Imaging Čerenkov“ Zähler (RICH), Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) und elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL) untergebracht.

**Myon-Plattform:** die Myon-Kammern hängen hinter bzw. zwischen Eisenabsorbern. Auch hier werden in der Nähe des Strahlrohres Detektoren mit kleiner Granularität (Myon-Pixelkammern) eingesetzt.

## Das HERA-B Target

Das Target besteht aus acht dünnen Drahtbändern, die um den HERA-Protonenstrahl angeordnet sind. Die ein-

zelnen Targets haben eine typische Abmessung von 500  $\mu\text{m}$  entlang der Strahlachse und 50  $\mu\text{m}$  in radialer Richtung. Zur Zeit sind Drähte aus unterschiedlichen Materialien eingebaut. Damit können Abhängigkeiten der Wechselwirkungsrate vom Targetmaterial untersucht werden. Der gesamte Aufbau befindet sich innerhalb des HERA-B Vertextanks, wenige Zentimeter vor der ersten Lage des Vertexdetektors.

Die Targets werden mit einer Präzisionsmechanik radial in den Randbereich des Protonenstrahls gefahren. Dabei regelt die Targetsteuerung etwa zehnmal pro Sekunde die Targetposition mit einer Schrittweite von 0.1  $\mu\text{m}$ , um die vorgegebene Wechselwirkungsrate konstant zu halten.

Seit mehreren Jahren wird das HERA-B Target kontinuierlich betrieben. Die Datennahme der anderen HERA-Experimente darf nicht beeinträchtigt werden. Dies ist bei stabilen HERA-Betriebsbedingungen auch gewährleistet. Nur eine Komponente des Experiments ZEUS, das „LPS“, hatte im Jahr 1999 Untergrundprobleme, die durch den Betrieb des HERA-B Targets verstärkt wurden. In einer gemeinsamen Anstrengung der HERA-Maschinengruppe und der HERA-Experimente wurden die Untergrundbedingungen und Betriebsparameter intensiv untersucht. Gegen Ende der Runperiode 1999 konnten die LPS-Betriebsbedingungen und damit die Interferenzen mit dem HERA-B Targetbetrieb durch eine Optimierung der HERA-Betriebsparameter und der Neupositionierung des LPS deutlich verbessert werden.

Die kontinuierliche Verbesserung der HERA-Betriebsparameter im Laufe der letzten Jahre hat zur Folge, dass nur noch sehr wenige Protonen den Strahlkern verlassen. Ihre Anzahl ist für den Betrieb des HERA-B Targets nicht ausreichend, deshalb muss das Target die benötigten Protonen aus dem Randbereich des Strahls herausstreuen. Dies führt zu einer sehr großen Empfindlichkeit gegenüber Strahlschwankungen. Bei einer Verschiebung von 10  $\mu\text{m}$  zwischen Target und Strahl ändert sich die Rate um einen Faktor zwei. Um eine stabile Wechselwirkungsrate zu erreichen, wurden in HERA Maßnahmen zur Aufweitung der Strahlränder durchgeführt. Die Herausforderung hierbei besteht darin, den Randbereich mit Protonen zu bevölkern, ohne dabei den für die  $e p$  Luminosität wichtigen Strahlkern aufzuweiten.

Die Protonen kreisen in HERA in einzelnen Teilchenpaketen. Vor allem auf der Außenseite des Strahls werden zusätzlich Protonen mit einer Rate von mehreren Megahertz beobachtet, die zwischen den Paketen eintreffen und wegen des unbekanntenen Wechselwirkungszeitpunktes ein Problem für Trigger und Rekonstruktion darstellen. Bis jetzt gibt es noch kein genaues Verständnis für die Produktion dieses Effekts. Gegen Ende des Jahres 1999 wurde regelmäßig versucht, mit Hilfe eines transversalen Kickermagneten diese Protonen aus der Maschine zu beseitigen. Dies hat erste vielversprechende Ergebnisse geliefert, bedarf aber weiterer Untersuchungen.

Die gleichzeitig stattfindenden Wechselwirkungen müssen möglichst gleichmäßig über mehrere Drähte verteilt werden, damit eine räumliche Trennung und somit eine effektive Rekonstruktion möglich ist. Die Targetsteuerung benutzt hierfür ein Ratensignal, das aus der durch  $\delta$ -Elektronen entstandenen Ladung im Targetdraht erzeugt wird, die proportional zur Wechselwirkungsrate ist. Mit Hilfe des Vertex-Detektor-Systems kann dann die Verteilung der Wechselwirkungsorte auf den Targets gemessen werden (Abb. 34).

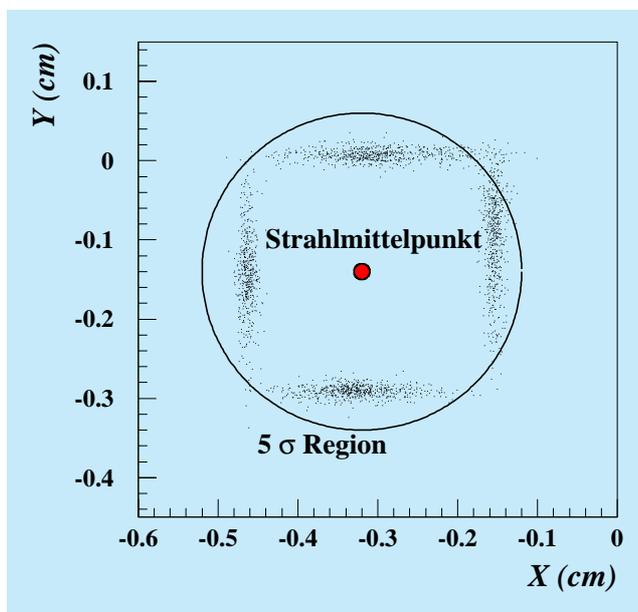


Abbildung 34: Verteilung rekonstruierter Wechselwirkungspunkte in der Ebene senkrecht zum Strahl. Die vier Bänder entsprechen den Targetdrähten; hier waren nur vier Drähte an den Strahl herangeführt.

Das HERA-B Target ist für die Datennahmeperiode im Jahr 2000 voll einsatzbereit. Die wesentlichen Anstrengungen liegen in einer weiteren Verbesserung der Ratenqualität, insbesondere in dem Bestreben, einen standardmäßigen Betrieb bei 40 MHz und damit eine möglichst hohe Effizienz der HERA-B Datennahme zu erreichen. Dies bedarf weiterhin der Unterstützung und engen Zusammenarbeit mit der HERA-Maschinengruppe.

## Silizium-Vertex-Detektor

Das Vertex-Detektor-System (VDS) besteht aus doppelseitigen Siliziumstreifenzählern, die mittels Manipulatoren bis auf einen radialen Abstand von 1 cm an die Strahlachse herangefahren werden können. Ihre Aufgabe ist es, Spuren möglichst genau und möglichst dicht an ihrem Entstehungspunkt (Vertex) zu vermessen.

Das VDS lief auch in seinem vierten Jahr zusammen mit all seinen Hilfssystemen, wie Detektorkühlung, gekoppelten Vakuumsystemen usw., störungsfrei. Die zur Kontrolle und Auslese des VDS nötigen Kabel und Lichtwellenleiter wurden vollständig verlegt. Die Infrastruktur, die zum Beladen des Tanks mit Modulen benötigt wird, wurde verfeinert, so dass sicheres und schnelles Be- und Entladen von Modulen möglich ist.

Die Messperiode 1999 wurde zur Inbetriebnahme des VDS genutzt. 56 der 64 Zähler sind eingebaut. Die Prozedur zum Bewegen der Detektoren wurde vereinfacht und automatisiert. Die Kontrolle der Ausleseketten wurde in die standardisierte Datennahmekette von HERA-B eingebunden. Das routinemäßige Alignment des Systems mit Hilfe rekonstruierter Spuren zeigt, dass das System über lange Zeiträume hinweg stabil bleibt. Die Mittelwerte der Verteilungen der Residuen liegen bei unter  $5 \mu\text{m}$ , die Standardabweichungen typischerweise bei  $30 \mu\text{m}$ . Zu beachten ist, dass bei der Spurselektion im Moment kein Impulsschnitt vorgenommen werden kann.

Die Effizienzen der Detektorebenen wurden mit Hilfe von Spuren bestimmt, die ohne den jeweils untersuchten Detektor rekonstruiert wurden. Typischerweise wurden Effizienzen von knapp 99% erreicht.

Die Programme zur unabhängigen Spurrekonstruktion innerhalb des VDS wurden wesentlich erweitert und

verbessert. Innerhalb der geometrischen Akzeptanz wurden in Monte Carlo-Studien Rekonstruktionseffizienzen von über 95% für Spuren mit einem Impuls über einem GeV erreicht. Die Anzahl der in den Daten gefundenen Spuren stimmt mit den Monte Carlo-Erwartungen innerhalb von 20% überein. Solche Untersuchungen sind aber auf Grund der in den Daten noch fehlenden Impulsinformation nicht sehr präzise. Es wurden weiterhin verbesserte Programme zur Bestimmung von Vertices entwickelt. Die bisher ohne Impulsinformation erreichten Auflösungen von Primärvertices liegen bei  $70\ \mu\text{m}$  transversal und  $700\ \mu\text{m}$  longitudinal. Abbildung 34 zeigt die Verteilung rekonstruierter Wechselwirkungspunkte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Inbetriebnahme des Vertex-Detektor-Systems 1999 weitgehend abgeschlossen werden konnte und dass das System den Erwartungen entspricht. Zum Anfang des Jahres 2000 wird das VDS vollständig mit Detektoren bestückt werden.

### Innere Spurkammern

Im Berichtsjahr wurde mit der Installation und der Inbetriebnahme des inneren Spurkammersystems begonnen. Es dient zum Nachweis von Spuren dicht am Strahlrohr, einem Bereich, wo wegen hoher Belegungsdichten eine besonders feine Granularität des Detektors gefordert ist.

HERA-B verwendet als erstes Experiment im inneren Spurkammersystem Mikrostreifen-Gasdetektoren (MSGC) mit integrierter Vorverstärkerfolie (GEM). Bezüglich der Strahlenbelastung sind die Detektoranforderungen vergleichbar denen der LHC-Experimente. Nach den im Jahr 1998 gewonnenen Erfahrungen mit MSGC-GEM-Detektoren wurde gegen Ende 1998 mit der Serienproduktion der Detektoren begonnen. Bei ersten Tests der Serienkammern zeigten sich jedoch Alterungsphänomene in Form von Ablagerungen auf den Zähltrahtstreifen, die bei Detektoren der Vorserie nicht beobachtet worden waren. Dies führte zu einer Verzögerung der Produktion gegenüber den Planungen, da erneut systematische Untersuchungen durchgeführt wurden, sowohl im Labor mit Röntgenstrahlen als auch bei einem weiteren Strahltest mit Protonen am Paul-Scherrer Institut in Villigen (Schweiz).

Durch diese Messungen konnte bestätigt werden, dass die auftretenden Alterungsphänomene nur bei Serienkammern zu beobachten sind. Bei Kammern der Vorserie trat unter gleichen Bedingungen keine Alterung auf. Eine Untersuchung der Zusammensetzung der Ablagerungen legt die Vermutung nahe, dass die Ursache in Reaktionen des DME (Quencheranteil im Zählgas) mit einem der zum Kammerbau verwendeten Materialien liegt. Dieses Problem konnte durch einen Wechsel des Zählgases von Ar-DME zu Ar-CO<sub>2</sub> gelöst werden. Bei Verwendung von CO<sub>2</sub> im Zählgas können die mit DME beobachteten Ablagerungen vermieden werden.

Aus früheren Untersuchungen mit Mikrostreifen-Gasdetektoren ohne Vorverstärkerfolie war allerdings bekannt, daß Ar-CO<sub>2</sub> gegenüber Ar-DME eine geringere Sicherheit gegenüber Funkenentladungen bietet. Deshalb wurde speziell die Betriebssicherheit bei der Verwendung von Ar-CO<sub>2</sub> untersucht. Nachdem in Untersuchungen geeignete Betriebsparameter gefunden wurden und in Langzeittests keine Gasalterung beobachtet wurde, konnte die Serienproduktion im April wieder aufgenommen werden. Bis Ende des Jahres konnten mehr als die Hälfte aller Detektoren installiert werden.

Parallel zur Installation der Detektoren wurde die Strahlzeit seit dem Sommer 1999 zur Integration des inneren Spurkammersystems in das allgemeine HERA-B Datennahme- und Kontrollsystem genutzt. Auch das Gassystem konnte schrittweise vervollständigt und in Betrieb genommen werden.

Erstmals konnten dabei Betriebserfahrungen mit einem großen MSGC-GEM System unter HERA-B Bedingungen gesammelt werden. Die gesamte Betriebszeit lässt noch keine Aussagen über das Langzeitverhalten der Detektoren zu, jedoch konnten die Hochspannungsfestigkeit und die Sicherheit vor Funkenüberschlägen und damit einhergehenden Zerstörungen der Detektoren bei den geplanten Betriebsparametern gezeigt werden.

Da ein Teil der Detektoren des inneren Spurkammersystems Triggersignale für den „First Level Trigger“ liefern soll, ist auf dem Auslesechip neben dem Analogteil noch eine Triggerlogik eingebaut. Dabei traten Probleme durch Übersprechen auf, die auch nach einer Verbesserung des Auslesechips noch nicht vollständig beseitigt sind. Es wurde daraufhin beschlossen, auf den Beitrag des inneren Spurkammersystems zum „First

Level Trigger“ für die Strahlzeit 2000 zu verzichten. Die Ausleseelektronik der Triggerlagen kann dann in der langen Betriebsunterbrechung zur Luminositätserhöhung umgerüstet werden.

Im Jahr 1999 konnten somit nach anfänglichen Schwierigkeiten die ersten großen Schritte zur Vervollständigung des inneren Spurkammersystems gemacht werden. Im kommenden Jahr wird die Installation des Gesamtsystems abgeschlossen und es können erstmals mit dem Gesamtsystem Daten genommen werden.

## Äußere Spurkammern

Das äußere Spurkammersystem von HERA-B dient dem Nachweis geladener Teilchen ab etwa 20 cm Entfernung vom Protonenstrahl bis hin zur äußeren Akzeptanzgrenze des Experiments. Es umfasst insgesamt 13 Messstationen, sogenannte Superlagen, die zwischen Vertexkammer und Kalorimeter an verschiedenen Positionen senkrecht zum Strahl angeordnet sind. Jede Superlage besteht aus zwei mechanischen Segmenten, die über und unter dem Protonen-Strahlrohr einander überlappen. Jedes Segment hat ein gasdichtes Gehäuse, in dem sich eine variable Zahl ebener Driftkammerlagen befindet. Alle Lagen sind aus etwa 30 cm breiten und 1–4.5 m langen Modulen zusammengesetzt. Ein massiver äußerer Rahmen gibt der Gasbox stabilen Halt.

Nach Abschluss des umfangreichen Messprogramms zur Untersuchung der Strahlungsfestigkeit der Module und der daraus resultierenden Design-Änderungen konnte die 1997 unterbrochene Modulproduktion Ende 1998 wieder aufgenommen werden. Auf 24 Montagevorrichtungen in fünf Instituten (DESY Hamburg und Zeuthen, JINR Dubna, IHEP und Tsinghua-Universität Beijing) entstanden bis Oktober 1999 alle 978 für den äußeren Spurdetektor benötigten Honeycomb-Driftkammermodule. Ein Drittel der Module wurde mit starker Unterstützung durch Fachkräfte aus Russland auf den acht Arbeitsplätzen in Hamburg gebaut.

Die Organisation der weltweit verteilten Modulproduktion und ihre Abstimmung auf die parallel laufende Installation des äußeren Spurdetektors in HERA-B stellte eine logistische Herausforderung beachtlichen Ausmaßes dar. Alle Modulmaterialien, wie zum Beispiel

die bei NIKHEF Amsterdam gefalteten und anschließend industriell metallbeschichteten Folien oder die am IJS Ljubljana gefertigten HV-Platinen, wurden zentral in Hamburg gesammelt und dann an alle Produktionsstätten versandt. Im Gegenzug trafen in einem genau abgestimmten Rhythmus die Module aus Beijing, Dubna und Zeuthen per Flugzeug oder LKW in Hamburg ein.

Vor der Freigabe zur Installation wurde jedes produzierte Modul einer ausführlichen Qualitätsprüfung unterzogen. Jeder einzelne der insgesamt 112 674 Signaldrähte musste im Test mit kosmischer Strahlung oder einer radioaktiven Quelle seine Funktionstüchtigkeit unter Beweis stellen. Die Ausfallrate durch Kurzschlüsse und andere Defekte liegt bei 1.2 %.

Die parallel zur Modulproduktion laufende Montage der Mechanik des äußeren Spurkammersystems nahm 1999 die DESY-Infrastruktur stark in Anspruch: In allen ehemaligen PETRA-Experimentierhallen wurden Teile gelagert oder Gasboxen und Kabelrahmen vormontiert. Die Endmontage der Detektorsegmente erfolgte in der eigens dafür hergerichteten Halle 5, unweit der HERA-Halle West, in der HERA-B betrieben wird. Hier wurden in einem 8 m hohen Staubschutzzelt die einseitig offenen Gasboxen an den Kabelrahmen fixiert, die Module in den Gasboxen installiert und selbige dann gasdicht geschlossen. Abbildung 35 zeigt eine Hälfte der größten Superlage TC2, die sich in HERA-B unmittelbar vor dem Kalorimeter befindet, kurz vor dem Schließen der Gasbox.

Dieses 4 m breite und 6 m hohe Detektorsegment wiegt etwa 3 t, wozu die Kabel von den an der Gasbox aufgesteckten Verstärkern zu den TDCs in den am Rahmen montierten Crates wesentlich beitragen. Die Inbetriebnahme dieser Elektronik bildete den Abschluss der Kammermontage.

Die Installation der äußeren Spurkammern in HERA-B erfolgte während der sechswöchigen HERA-Betriebspause im Mai/Juni sowie in einer Serie von monatlichen, jeweils drei Tage langen Kurzunterbrechungen von Juli bis Dezember. Dank guter Vorbereitung der Infrastruktur (Aufhängungen, Kabel, Gasleitungen) im Mai/Juni und minutiöser Planung gelang es, bis zu fünf Kammerhälften pro Zugangsperiode zu installieren. An dieser Stelle ist die gute Kooperation mit dem DESY-Hallendienst hervorzuheben.

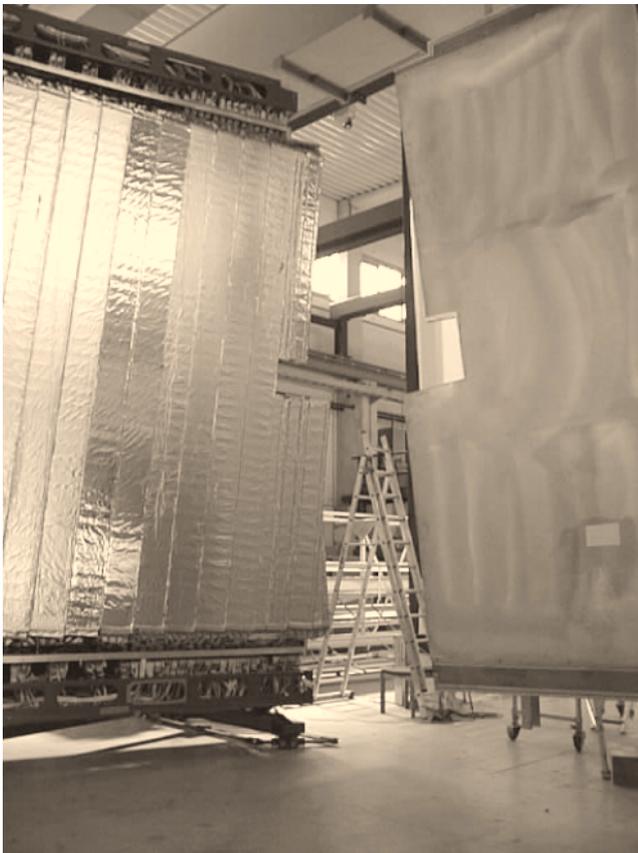


Abbildung 35: Die letzte und größte Superlage des äußeren Spurkammersystems. Die modulare Struktur der äußersten Driftkammerlage ist deutlich zu erkennen.

Wichtige Systeme, die den Betrieb des äußeren Spurkammersystems überhaupt erst ermöglichen, sind die Ausleseelektronik sowie das Hochspannungs- und das Gassystem. Mit seinen 833 auszulesenden TDC-Einheiten ist der äußere Spurdetektor die größte Einzelkomponente im Datennahmesystem von HERA-B. Da er sich über das gesamte Experiment erstreckt und damit auf natürliche Weise alle Subdetektoren miteinander verbindet, lieferte das im Laufe des Jahres rasch wachsende System wichtige Impulse für die Entwicklung der gemeinsamen Datennahme.

Neben den Daten zur präzisen Spurrekonstruktion liefert der äußere Spurdetektor auch die Signale für die erste Triggerstufe von HERA-B. Nach anfänglichen Problemen konnte auch dieser Auslezweig erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Das Hochspannungssystem des äußeren Spurdetektors versorgt 7200 Drahtgruppen aus 160 primären Quellen. Jede frisch installierte Kammer wurde in den ersten Tagen langsam auf ihre Betriebsspannung hochgefahren („trainiert“). Abgesehen von der zuerst eingebauten Kammer, deren Module noch nicht mechanisch versteift waren, ließ sich der gesamte Detektor problemlos in Betrieb nehmen. Die defekte Kammer wurde während der Weihnachtsunterbrechung 1999/2000 repariert. Damit präsentiert sich der äußere Spurdetektor zu Beginn der Datennahme 2000 von der Hochspannungsfestigkeit her in einem guten Zustand.

Während des Betriebs werden die Kammern des äußeren Spurdetektors von einem speziellen Zählgas, einer Argon/CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>-Mischung, durchspült. Das im Laufe des Berichtsjahres aufgebaute Gassystem sorgt dafür, dass das Detektorvolumen von etwa 20 m<sup>3</sup> einmal pro Stunde ausgetauscht wird. Spezielle Reinigungseinheiten und die Zufuhr einiger Prozent Frischgas sorgen in diesem Kreislaufsystem für eine konstant gute Gasqualität. Die extrem störenden Sauerstoff- und Wasseranteile werden damit unter 0.1% gehalten. Zur Entwicklung des Reinigungssystems fanden im Laufe des Jahres ausgiebige Tests an einer im HASYLAB aufgebauten Röntgenquelle statt.

Der 1998 begonnene Test von Prototypkammern im HERA-B Gebiet wurde bis zum Mai 1999 fortgesetzt. Als letzte Testkammer kam im März noch ein Prototyp mit der vollen Länge von 4.5 m zum Einsatz, der erstmals von einem Kreislauf-Gassystem versorgt wurde. Das robuste Verhalten aller dieser Kammern führte Mitte 1999 zu der Entscheidung, die bis dahin verfolgte Entwicklung eines auf „Straw Tubes“ basierenden Alternativkonzepts für den äußeren Spurdetektor bis zum Ende der Datennahme im Jahr 2000 ruhen zu lassen. Alle Testkammern wurden im Mai/Juni ausgebaut, um Platz für die Installation des endgültigen Detektors zu schaffen. Dessen schrittweise Inbetriebnahme war der Schwerpunkt bei der Datennahme in der zweiten Jahreshälfte.

Erste Analysen der Daten dienten dazu, die installierte Hardware zu überprüfen. Spezielle Datennahme-Serien wurden dazu benutzt, den optimalen Arbeitspunkt des Detektors (Hochspannung und Elektronikschwellen) festzulegen und das Verhalten bei verschiedenen Targetraten bis zu 80 MHz, dem doppelten Designwert, zu studieren. Viele wertvolle Informationen erhält man

bereits ohne Spurrekonstruktion einfach aus den in verschiedenen Bereichen des Detektors gemessenen Trefferdichten.

Die schon länger existierende und mit Monte Carlo-Daten entwickelte Software zur Spurrekonstruktion wurde an die Bedürfnisse des real existierenden Detektors mit allen seinen kleinen Unzulänglichkeiten, wie tote Regionen, Drähte mit hohem Untergrund usw., angepasst. Die Entwicklung der Programme zur Eichung und zur Justierung des Detektors dauert noch an.

## Ring Imaging Čerenkov Zähler

Der „Ring Imaging Čerenkov“ Zähler (RICH) dient zur Unterscheidung von Pionen, Kaonen und Protonen durch die Messung des Winkels von Čerenkov-Photonen. Er war schon im Vorjahr komplett installiert worden und wurde Anfang Januar 1999 das erste Mal mit dem vorgesehenen Radiatorgas  $C_4F_{10}$  gefüllt.

Die anschließenden Testmessungen zeigten, dass der HERA-B RICH die beiden wichtigsten Designkriterien, Zahl der nachgewiesenen Čerenkov-Photonen und

Winkelauflösung, voll erfüllt: Für  $\beta = 1$  Teilchen wurden 34 Photonen pro Ring gemessen, der Fehler in der Winkelbestimmung betrug weniger als 0.7 mrad.

Im Laufe des Jahres wurde in den Zugangsperioden die Verfügbarkeit der Auslesekanäle verbessert, so dass es zur Zeit bei den knapp 27 000 Kanälen nur 0.3% unbenutzbare gibt. Auch wurde ein neuer 1500-Liter-Lagertank mit genauer Füllstandsanzeige für das verflüssigte Radiatorgas installiert.

Der HERA-B RICH, der eigentlich für die Identifikation der Teilchen schon gefundener geladener Spuren konzipiert ist, wurde in der Anfangsphase mangels vorhandener Spurrkammern auch zur Spurfindung eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur Suche nach Čerenkov-Ringen entwickelt, die keine Information von anderen Detektorkomponenten benötigt. Da der Ring nur die Richtung des Teilchens festlegt, werden weitere Raumpunkte, wie zum Beispiel Vertexspursegment und Cluster im Kalorimeter, zur Impulsbestimmung benötigt. Abbildung 36 zeigt die Korrelation zwischen Čerenkov-Winkel  $\theta_C$  und Teilchenimpuls  $p$  für Spuren, die ein Vertexsegment, RICH-Ring und ECAL-Cluster aufweisen. Die Teilchensorten Elektron, Pion, Kaon und Proton sind bei dieser Darstellung als klare Bänder erkennbar.

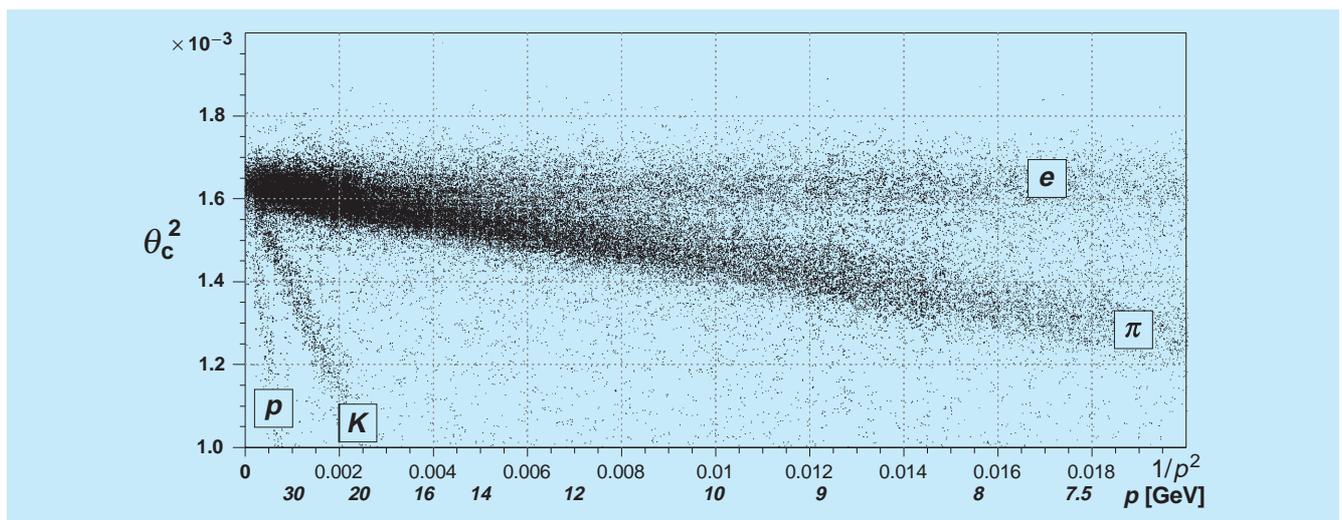


Abbildung 36: *Quadrat des Čerenkov-Winkels als Funktion des reziproken Impulsquadrates, gemessen mit Hilfe des Silizium-Vertex-Detektors, des RICH und des Kalorimeters. Da Winkel und Impuls der Relation  $1/p^2 \sim \theta_C^2$  genügen, sind die Teilchensorten Elektron, Pion, Kaon und Proton bei dieser Darstellung als klare Bänder identifizierbar.*

Zusammen mit Information von anderen Detektorkomponenten konnten auch einige Signale für Teilchenzerfälle beobachtet werden, zum Beispiel  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  (Abb. 39) und  $K^{0*} \rightarrow \pi^-K^+$ . Der Untergrund im Kanal  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  konnte mit Hilfe der Information vom RICH erheblich reduziert werden (Abb. 40).

## Die Myon-Kammern

Im Berichtszeitraum wurde die Installation der Myon-Kammern (Abb. 37) beendet. Alle Lagen mit den Tube-, Pad- und Pixel-Kammern, hergestellt im ITEP Moskau, wurden mit der Ausleseelektronik, produziert in der Wayne State University in Detroit, ausgestattet und auf



Abbildung 37: Installation der Myon-Kammern.

ihren Rahmen in der endgültigen Position montiert. Der Myon-Detektor hat seinen Betrieb aufgenommen.

Nach der Zugangsperiode im Mai/Juni folgte eine lange Periode der Datennahme, während der eine große Zahl von Detektortests und Physikstudien durchgeführt wurde. Alterungsprozesse in den Kammern wurden mit verschiedenen Gasen studiert. Zwei Rekonstruktions-Algorithmen für Myonen wurden getestet: der eine sucht ohne Information von anderen Detektorkomponenten nach Spuren in den Myon-Kammern, der andere basiert auf Spuren, die zuvor in den äußeren und inneren Spurkammern gefunden worden sind.

Ende November wurden zum ersten Mal Daten mit dem teilweise eingebauten Myon-Pretrigger aufgenommen. Der Pretrigger lief bemerkenswert zuverlässig und erste Analyseergebnisse lassen eine gute Funktionalität erwarten.

## First Level Trigger

Die erste Auslösestufe („First Level Trigger“ – FLT) rekonstruiert Spuren geladener Teilchen mit Hilfe ausgewählter Spurkammern des Detektors. Die Einbeziehung des elektromagnetischen Detektors und der Myon-Kammern im sogenannten „Pretrigger“ erlaubt bereits eine erste Teilchen-Identifikation. Ferner werden durch die Spurrekonstruktion des FLT der Impuls und die Ladung der Teilchen bestimmt. Die Daten werden ausgelesen, wenn die invariante Masse eines Myonen- oder Elektron-Positron-Paares konsistent mit einem  $J/\psi$  ist.

Im Berichtsjahr war das Augenmerk der verschiedenen am FLT beteiligten Gruppen darauf gerichtet, die Produktion der Elektronik-Baugruppen durchzuführen und die Inbetriebnahme des Gesamtsystems soweit voranzutreiben, dass eine Datennahme von HERA-B Anfang 2000 möglich ist. Die letzten Änderungen im Entwurf des FLT wurden erst Anfang 1999 durchgeführt. Dennoch gelang es, die gesamte Hardware, mit Ausnahme eines kleinen Teils der Pretrigger-Systeme, vor Ende des Jahres fertigzustellen.

Die Datenübertragung zwischen dem Myon-Pretrigger-System und der Spurerkennung des FLT wurde auf Zuverlässigkeit getestet. In allen Fällen waren die gemessenen Fehlerraten akzeptabel bis sehr gut. Zusätzlich

wurden weitere technische Parameter, wie zum Beispiel Latenzzeiten, gemessen und mit den Spezifikationen verglichen.

Zusammen mit dem Pretrigger des elektromagnetischen Kalorimeters, das zu 65% mit Pretrigger-Elektronik bestückt war, wurde für das Experiment das erste Mal ein Physiktrigger in Betrieb genommen. Dieser Trigger wurde unter anderem auch für die Datennahme genutzt, in der  $J/\psi$  Mesonen nachgewiesen wurden (Abb. 40).

## Datennahmesystem

Das HERA-B Datennahmesystem hat die Aufgabe, die etwa 600 000 Signale, die im Detektor HERA-B alle 96 ns erzeugt werden, während der Triggerentscheidungen zu puffern, zwischen den Puffern der verschiedenen Triggerstufen zu transportieren und schließlich auf Massenspeichern zu sichern. Die dazu benötigte Elektronik und deren Programmierung ist das Datennahmesystem (DAQ).

In Abbildung 38 ist eine Übersicht der logischen Einheiten des Systems gegeben. In dieser Darstellung sind nur das „Schnelle Kontrollsystem“, das die Triggersignale verteilt, und der Hauptdatennahmeweg dargestellt. Es gibt acht verschiedene Subsysteme mit zwischen 6000 und 176 000 Auslesekanälen pro Subsystem. Alle Komponenten des Systems wurden 1999 bei der Datennahme betrieben.

Die „First Level Trigger“-Rate war dieses Jahr mit maximal 12 kHz (Endausbaustufe 50 kHz) erstmalig in der Nähe der Designwerte. Der limitierende Faktor war die Notwendigkeit, alle Daten des elektromagnetischen Kalorimeters mit jedem Level 1 Trigger auszulesen. Dies wird in der Endausbaustufe des FLT nicht mehr notwendig sein.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass etwa 90% des Gesamtsystems verwendet worden sind. Der Datendurchsatz hatte bereits die endgültige Größe. Die größte Extrapolation zum Gesamtsystem ist bei der FLT-Rate notwendig. Im Jahr 2000 werden diese Extrapolation und eine Verbesserung der Datennahme-Effizienz im Vordergrund stehen.

## Trigger- und Rekonstruktionsfarm

Der Trigger Level4 dient zur Rekonstruktion aller Ereignisse während der Datennahme („Online-Rekonstruktion“, identisch mit dem Offline-Rekonstruktionsprogramm). Er ist auf einer „Farm“ von 200 Personal Computern (PC) realisiert. Hier wird die endgültige Ereigniseselektion durchgeführt. Gleichzeitig wer-

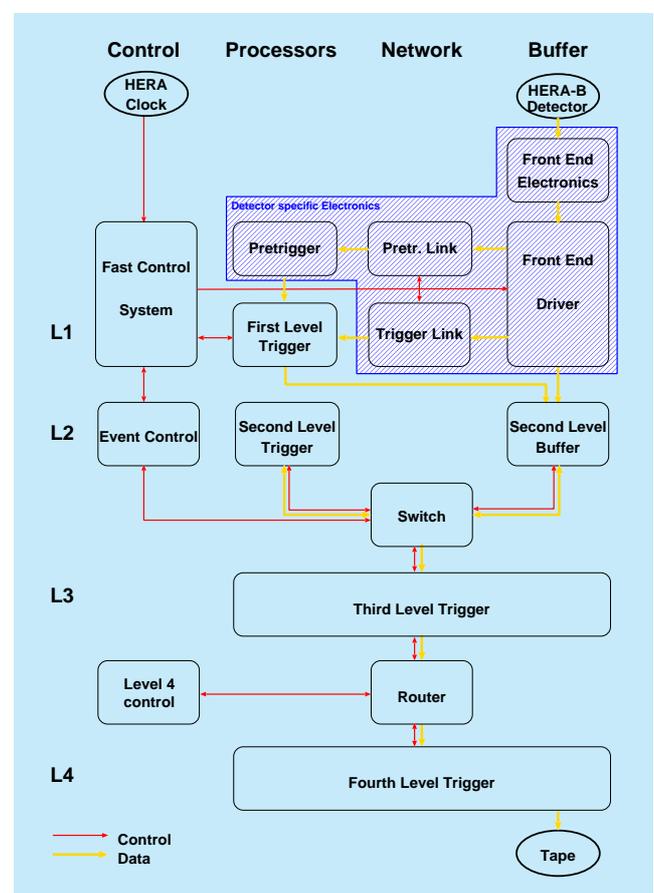


Abbildung 38: HERA-B DAQ-Architektur: Links das Kontrollsystem (gezeigt ist nur das sogenannte schnelle Kontrollsystem, das den Datenfluss kontrolliert und die Trigger-Entscheidungen weitergibt), in der Mitte die jeweiligen Prozessoren und Netzwerke, und rechts der Weg der Daten von der Ausleseelektronik über einen Zwischenspeicher („Second Level Buffer“) zu den weiteren Triggerstufen und schließlich zur endgültigen Archivierung auf Band. Der schattierte Teil umfasst alle Einheiten, die spezifisch für jedes Subsystem sind.

den die Qualität der Daten und die Funktionsfähigkeit des Detektors überwacht. Daten für Kalibration und Alignment des Detektors werden bereitgestellt. Wenn die Datennahme ruht, können vorher gemessene Daten reprozessiert werden.

Die Installation der kompletten Farm von Personal Computern war bis Ende 1999 abgeschlossen. Die PCs werden mit dem Betriebssystem LINUX betrieben. Software für die Verteilung der Ereignisse vom DAQ-System zu den Farmknoten und von den Farmknoten zur Archivierung ist fertiggestellt und getestet. Software zum Reprozessieren der Ereignisdaten wurde entwickelt, getestet und in Betrieb genommen.

HERA-B hat von Ende 1998 bis jetzt etwa 7 Tera-byte an Daten aufgezeichnet und auf Band gespeichert. Die Farm hat sich als Teil des DAQ- und Triggersystems bewährt. Die Designwerte für die Datenraten zur Farm (50 Hz, 5 MB/sec) und von der Farm zum Archiv (20 Hz, 2 MB/sec) wurden deutlich übertroffen.

Das HERA-B Rahmenprogramm ARTE läuft standardmäßig auf der Farm. Für einige Runs wurde eine vollständige Ereignisrekonstruktion online auf 40 Prozessoren durchgeführt und die Ergebnisse wurden archiviert. Auf Basis der Ereignisrekonstruktion werden auf jedem PC Histogramme zur Überwachung der Datenqualität und zu Kalibrierungs- und Alignmentszwecken gefüllt. Ein zentrales Programm sammelt die Histogramme von den einzelnen PCs und stellt sie zur Auswertung zur Verfügung. Arbeiten an Online-Kalibrierung und Alignment, bei der die auf der Farm eingesammelten Daten ausgewertet und die Datenbanken entsprechend geändert werden, haben begonnen.

## Software

Die Daten des Jahres 1999 wurden dazu benutzt, die gesamte Auswertekette der Software für HERA-B zu testen. Dabei standen die Rekonstruktions-Software der verschiedenen Detektorkomponenten und ihr Zusammenspiel im Vordergrund. All diese Programme waren vorher intensiv mit simulierten Daten getestet worden.

Der Übergang von Monte Carlo-Daten zu tatsächlich gemessenen Daten wirft mehrere Probleme auf:

- Die Ansprechwahrscheinlichkeiten einzelner Detektorkanäle können nur ungenau simuliert werden, solange keine Messungen darüber vorliegen. Insbesondere der Ausfall ganzer Bereiche ist nur schwer zu simulieren. Inzwischen existieren Listen, die die gemessenen Nachweiswahrscheinlichkeiten und die vorhandenen toten Bereiche katalogisieren. Diese Listen werden für die Monte Carlo-Simulation der Ereignisse verwendet. Entsprechendes gilt für Untergrund wie elektronisches Rauschen usw. Auch hier ist das Monte Carlo den gemessenen Daten angepasst worden.
- Ein Problem, das speziell den Berichtszeitraum betraf, bestand darin, dass sich der Detektor in kurzen Zeitabständen veränderte, indem immer mehr Detektorkanäle eingebaut wurden. Schon beim Simulieren von Monte Carlo-Ereignissen musste eine Prozedur gefunden werden, die es gestattet, die gleichen generierten Ereignisse für verschiedene Ausbaustufen des Detektors zu verwenden. In der Rekonstruktion wurden anfangs Prozeduren benutzt, die es erlauben, auch ohne die damals nicht vorhandenen Messungen im äußeren und inneren Spurkammersystem Spuren zu erkennen (einschließlich der Messung des Impulses). Zu diesem Zweck wurden Prozeduren entwickelt, die im Vertexdetektor, im RICH, im ECAL und in den Myon-Kammern Spuren zu erkennen vermögen, ohne Information von den jeweils anderen Detektorkomponenten zu benötigen. Gegen Ende des Jahres konnten dann die endgültigen, seit langem existierenden Rekonstruktionsprogramme angewendet werden, die davon ausgehen, dass Spurerkennung im Vertexdetektor oder im äußeren/inneren Spurdetektor stattfindet, was zu einer erheblich höheren Nachweiswahrscheinlichkeit führt. Die so rekonstruierten Spuren werden dann mit der Information von RICH, TRD, ECAL und Myon-System kombiniert.
- Alignments- und Kalibrationsprozeduren lassen sich nur mit gemessenen Daten sinnvoll testen. Die notwendigen Konstanten für Kalibration und Alignment sind inzwischen mit einer Genauigkeit bekannt, die es erlaubt, die endgültige Rekonstruktion durchzuführen. Die Genauigkeit dieser Konstanten wird durch die fast abgeschlossene Vervollständigung des Detektors und durch erhöhte Statistik ständig verbessert. Ein HERA-B spezifisches Problem ist, dass schon auf der Online-Farm die

endgültige Rekonstruktion durchgeführt wird und dass dazu die Alignments- und Kalibrationskonstanten bekannt sein müssen. Diese Konstanten müssen also quasi online bestimmt werden. Die Prozeduren dazu sind die gleichen wie für entsprechende Offline-Prozeduren. Die technischen Voraussetzungen, um diese Konstanten, die auf 200 verschiedenen Farmknoten berechnet werden, zu sammeln, auf eine Datenbank zu schreiben und dann wiederum den 200 Farmknoten zur Verfügung zu stellen, sind gelöst.

Das gesamte Rekonstruktionspaket für HERA-B ist online (Level 4) und offline erfolgreich getestet worden. Der Zeitverbrauch auf der Farm ist momentan noch

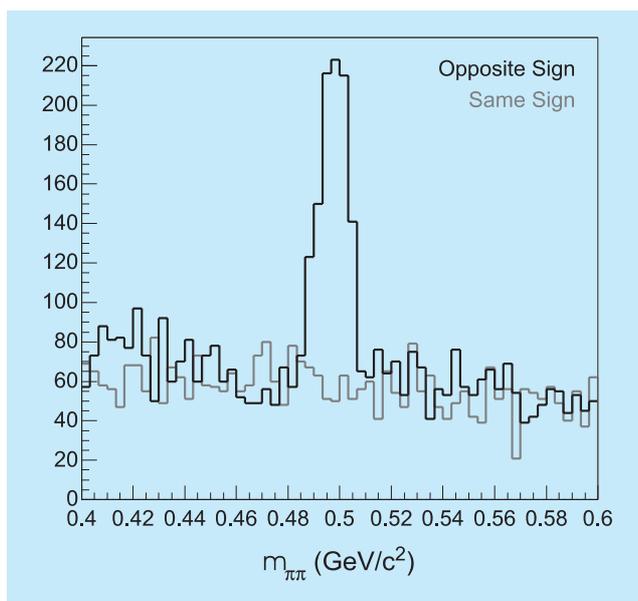


Abbildung 39: Der Zerfall  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Gezeigt wird die invariante Masse von  $\pi^+\pi^-$ -Kombinationen („Opposite Sign“) und  $\pi^+\pi^+/\pi^-\pi^-$ -Kombinationen („Same Sign“). Von den Pionen wurde verlangt, dass sie nicht auf einen der Targetdrähte zeigen und also nicht von der primären Wechselwirkung des Protons mit dem Target kommen können. Andererseits müssen die Pionen aus einem gemeinsamen Vertex kommen, dem potenziellen Zerfallsvertex des  $K_S^0$ . Während bei gleichen Ladungen nur Zufallskombinationen auftreten, die keine Struktur im Massenspektrum ergeben, zeigt sich im Fall von  $\pi^+\pi^-$ -Kombinationen ein deutliches Signal bei der Masse des  $K_S^0$ .

um einen Faktor zwei zu hoch. Verbesserungen sind zu erwarten durch weitere Optimierung des Programms, vor allem aber durch einer Reduzierung der Zahl toter Kanäle und durch höhere Messgenauigkeit. Auch die Nachweiswahrscheinlichkeit für Spuren und die Wahrscheinlichkeit, falsche Spuren zu rekonstruieren, die „Ghost-Rate“, hängt stark von der Messeffizienz und -Genauigkeit ab, die beide laufend verbessert werden. Das Rekonstruktionsprogramm verhält sich wie durch Monte-Carlo Simulation erwartet und erlaubt es, sowohl detaillierte Studien der Detektor-Funktionalität als auch physikalische Analysen durchzuführen.

## Resultate und Ausblick

Im Verlauf des Jahres 1999 wurden die Möglichkeiten, physikalische Analysen mit HERA-B durchzuführen,

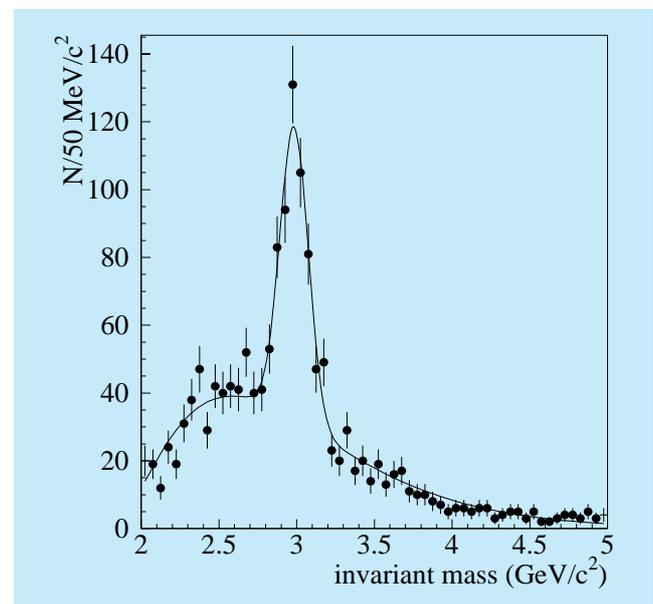


Abbildung 40: Der Zerfall  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ . Gezeigt wird die invariante Masse von  $e^+e^-$ -Kombinationen. Deutlich ist ein Signal bei der Masse des  $J/\psi$  zu sehen (bei 3.1 GeV), das auf einem Untergrund von Zufallskombinationen liegt. Dieser Untergrund steigt eigentlich unterhalb von 2.5 GeV extrem stark an. Durch den Trigger werden diese uninteressanten Ereignisse jedoch gleich am Anfang der Datennahmekette zurückgewiesen.

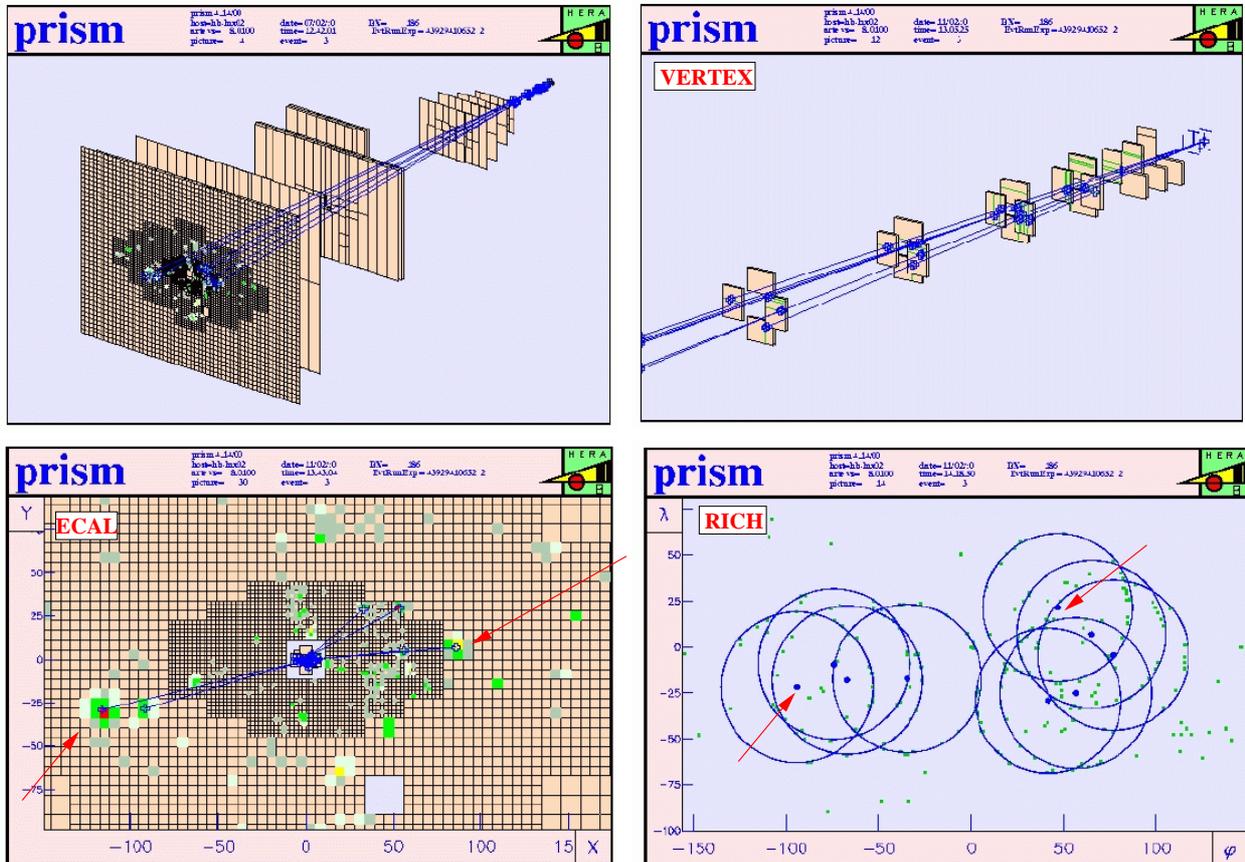


Abbildung 41: HERA-B: Ein einzelnes Ereignis des Zerfalls  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , wobei die Information der verschiedenen Detektorkomponenten separat dargestellt ist. Gezeigt werden die im Vertexdetektor rekonstruierten Spuren, die Blöcke des elektromagnetischen Kalorimeters welche angesprochen haben, sowie die im RICH rekonstruierten Ringe. Die Elektron- bzw. Positron-Spuren sind jeweils gekennzeichnet.

ständig verbessert. Abbildung 39 zeigt ein klares  $K^0$ -Signal in der  $\pi^+\pi^-$  Massenverteilung für Spurkombinationen mit einem rekonstruierten Zerfallsvertex. Bei Kombinationen, bei denen beide Spuren vom Targetdraht kommen, ist kein Signal zu beobachten. Für die Analyse sind der Vertexdetektor, RICH und ECAL benutzt worden, jedoch noch nicht die inneren und äußeren Spurkammern.

Ein wesentliches Ziel des Experiments ist es,  $J/\psi$ -Mesonen zu rekonstruieren. Die momentan verfügbare Statistik erlaubt es noch nicht, zwischen „promp-

ten“  $J/\psi$ -Mesonen, die in der primären Wechselwirkung entstehen, und solchen aus den Zerfällen von B-Mesonen zu unterscheiden. Das Signal für  $J/\psi$ -Mesonen in der invarianten  $e^+e^-$ -Massenverteilung hat sich im Lauf des Jahres kontinuierlich verbessert. Ein Beispiel dafür aus einer kurzen Datennahmepériode im Oktober/November 1999 wird in Abbildung 40 gezeigt.

Die Analyse basiert im Wesentlichen auf dem Vertexdetektor und dem elektromagnetischen Kalorimeter. Auch hier sind die inneren und äußeren Spurkammern

nicht berücksichtigt. Um Untergrund zu unterdrücken wird sowohl ein gut gemessener Ring im Čerenkov-Zähler als auch ein nachgewiesenes Bremsstrahlungs-Photon im ECAL verlangt. In Abbildung 41 ist die Detektorinformation für ein Ereignis mit einem Zerfall  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  dargestellt.

Anfang des Jahres 2000 werden die letzten verbleibenden Zähler eingebaut. In der Messzeit bis September werden folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- Inklusive Wirkungsquerschnitte verschiedener Teilchenarten ( $\gamma$ ,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $K$ ,  $K^*$ ,  $\phi$  usw.) und die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts vom Atomgewicht des Targets,
- Produktion „prompter“  $J/\psi$ -Mesonen, im Unterschied zu  $J/\psi$ -Mesonen aus B-Zerfällen,
- Zerfälle  $B \rightarrow J/\psi X$  und Messung des Wirkungsquerschnitts von Bottom-Hadronen,
- Zerfälle  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$  und Suche nach CP-Verletzung.

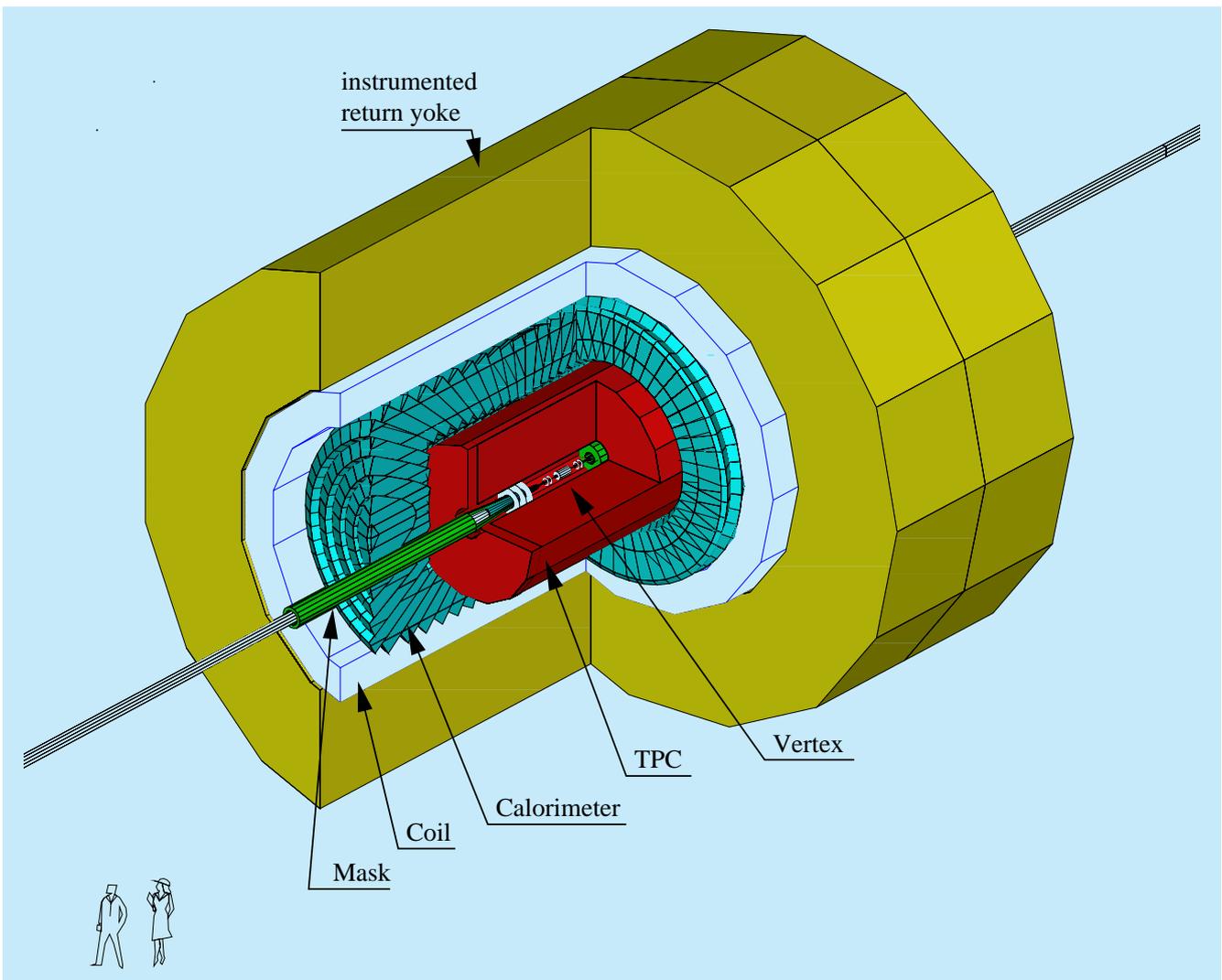


Abbildung 42: Perspektivische Ansicht des TESLA Detektors. Nicht gezeigt ist das Myon-System, das den Detektor komplett umschließt.

# Forschung an Lepton Collidern

Im Jahre 1999 sind am DESY die Arbeiten für die Vorbereitung des Linearbeschleuniger-Projektes TESLA weiter vorangetrieben worden. Daran beteiligt sind Mitglieder und Gäste der Gruppe FLC sowie im Rahmen der ECFA/DESY Studie etwa 66 Institute aus 17 Ländern. Seit dem Frühjahr 1998 veranstalten ECFA und DESY eine gemeinsame Studie, in der die teilchenphysikalischen Fragestellungen, die mit TESLA angegangen werden sollen, untersucht werden und nach Lösungen für einen Detektor an einer solchen Maschine gesucht wird. An dieser Studie nehmen zahlreiche Wissenschaftler aus vielen europäischen und außereuropäischen Ländern teil.

Ein Höhepunkt des Jahres war die internationale LCWS99 Konferenz, die in Sitges, Spanien, im Mai abgehalten wurde und einen Überblick über den Stand der Entwicklungen der verschiedenen Linearcollider Projekte in der Welt gab. In einer Serie von Treffen wurden physikalische und technische Fragestellungen bearbeitet.

Seit der Veröffentlichung des „Conceptual Design Report“ im Jahre 1997 hat es erhebliche Entwicklungen bei der Konzeption der Maschine gegeben. Die erwartete Luminosität ist deutlich höher als bisher angenommen. Eines der Hauptziele der ECFA/DESY Studie ist es, zu untersuchen, welche Möglichkeiten diese hohe Luminosität eröffnet. Ein weiterer Schwerpunkt der Studie ist es, ein realistisches Detektormodell für TESLA (Abb. 42) zu erstellen, das den hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit entspricht.

DESY hat im Berichtszeitraum im Bereich der Physik und der Detektorentwicklungen für einen zukünftigen Linearcollider intensiv an der Studie mitgearbeitet. Physikerinnen und Physiker beider DESY Labore und der am DESY existierenden Experimente nehmen aktiv an den Arbeiten teil.

## Physik am Linearbeschleuniger TESLA

Das Standard-Modell der Teilchenphysik ist eine außerordentlich erfolgreiche Theorie, die die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen beschreibt. Viele Experimente haben in den letzten Jahren die Gültigkeit und die Grenzen dieser Theorie erforscht. Trotz aller Bemühungen fehlt aber nach wie vor ein ganz zentraler Teil der Theorie. Das Standard-Modell sagt ein weiteres Teilchen, das Higgs-Boson, voraus, dessen Existenz notwendig ist, um die beobachteten Massen der verschiedenen Teilchen zu erklären. Dieses Teilchen ist bisher experimentell nicht nachgewiesen worden. Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe von Argumenten, weshalb das Standard-Modell in seiner heutigen Form nicht die „endgültige“ Theorie der Elementarteilchen sein kann.

An einem Linearbeschleuniger wie TESLA werden alle bekannten Teilchen, wie zum Beispiel Eichbosonen und top-Quarks, in großer Zahl produziert. Die zumindest theoretisch weitgehend untergrundfreien Bedingungen an einer solchen Maschine ermöglichen viele verschiedene Untersuchungen an diesen Teilchen, mit denen neue und verbesserte Einsichten in das Standard-Modell gewonnen werden können. LEP und andere Beschleuniger haben in den letzten Jahren demonstriert, wie mächtig Präzisionsmessungen bekannter Prozesse und Teilchen sein können, wenn es darum geht, die Grenzen bekannter Theorien zu erkunden. Der Linearbeschleuniger wird in der Lage sein, diese Studien in einen neuen Bereich auszudehnen, und damit das Standard-Modell genauer als bisher möglich zu überprüfen. Vieles deutet darauf hin, dass in dem Energiebereich bis etwa 1 TeV, der mit TESLA zugänglich sein wird, viele offene Fragen des Standard-Modells beantwortet werden können, oder dass Abweichungen auftreten, die richtungweisend für ein tieferes Verständnis der elementaren Materie sein werden.

In diesem Jahrzehnt werden mit dem Tevatron II und dem LHC zwei Maschinen fertiggestellt werden, die erste Schritte in diese neuen Energiebereiche unternehmen werden. In vieler Hinsicht wird dies aber nicht ausreichen. Das grundlegende Verständnis der Physik hängt nicht nur von der Entdeckung neuer Teilchen ab, sondern ebenso davon, ihre Eigenschaften präzise zu bestimmen. Ein Elektron-Positron-Linearbeschleuniger, der aufgrund der sehr hohen Brillianz und des gut definierten Ausgangszustandes prädestiniert für Präzisionsmessungen ist, ist die logische Ergänzung der geplanten Maschinen.

Ein Schlüssel zum tieferen Verständnis des Standard-Modells ist das Higgs-Boson. Aus den bis heute bekannten Daten kann man ableiten, dass das Higgs-Boson eine Masse haben sollte, die in dem Bereich liegt, der von LEP II, dem Tevatron, oder spätestens dem LHC abgedeckt werden kann. Die Entdeckung kann aber nur der erste Schritt sein. Um seinen Platz in der Theorie der Elementarteilchen zu definieren, ist eine detaillierte Untersuchung der Eigenschaften dieses Teilchens notwendig. Die Masse, die Breite, und die verschiedenen Zerfälle des Higgs-Bosons müssen mit möglichst guter Genauigkeit vermessen werden. Nur so kann die Natur des Higgs-Bosons bestimmt werden, nur so kann entschieden werden, ob es ein oder mehrere Higgs-Bosonen gibt, und wie sie sich in die Theorie einordnen. Viele dieser Untersuchungen sind nur mit großen Schwierigkeiten oder gar nicht an Hadron-Maschinen durchzuführen. Ein Linearbeschleuniger wird hier sehr viel leisten können und helfen, die Theorie besser zu verstehen.

Trotz aller Erfolge des Standard-Modells sind aber viele Physiker davon überzeugt, dass dieses Modell nicht die endgültige Theorie sein kann. Dazu existieren zu viele Probleme in den verschiedensten Bereichen. Viele dieser Schwierigkeiten lassen sich in erweiterten Theorien lösen. Ein besonders attraktives Konzept ist das der Supersymmetrie. Allerdings fehlt bisher jegliche experimentelle Evidenz dafür, dass Supersymmetrie in der Natur verwirklicht ist. Es gibt aber viele Argumente dafür, dass Supersymmetrie – oder eine ähnliche Theorie – in der Natur realisiert ist. Supersymmetrie sagt ein reichhaltiges Spektrum an neuen Teilchen voraus. Unterschiede zwischen verschiedenen supersymmetrischen Theorien spiegeln sich in den Spektren dieser Teilchen wider. Sollte es Supersymmetrie geben, so ist es sehr

wichtig, möglichst viele dieser Teilchen möglichst genau zu vermessen. Nur so kann eine Entscheidung getroffen werden, welche der möglichen Theorien in der Natur realisiert ist. Die Fähigkeit eines Linearbeschleunigers, die Energie der Kollision stufenlos zu variieren und damit kontrolliert Teilchen verschiedener Masse zu erzeugen, kann sich als ein ganz entscheidendes Element herausstellen, Supersymmetrie experimentell zu untersuchen.

Natürlich kann es sein, dass keine der Vorstellungen, die wir heute haben, in der Natur verwirklicht ist. Vielleicht gibt es kein Higgs-Boson, 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 der bekannten Prozesse bei möglichst hohen Energien die einzige Möglichkeit sein, unsere Erkenntnisse über die fundamentalen Kräfte und Teilchen zu erweitern und zu entscheiden, welches der verschiedenen theoretischen Modelle stimmt.

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

## Physikalische Studien

Im Rahmen des ECFA/DESY Workshops werden viele Studien durchgeführt, um das Potential von TESLA zu untersuchen. In Hamburg werden die Arbeiten in enger Zusammenarbeit mit Gruppen der theoretischen Physik und auswärtigen Arbeitsgruppen, speziell Gruppen von der Universität Hamburg, durchgeführt. Hier sollen nur einige wenige ausgewählte Ergebnisse erwähnt werden.

In Abbildung 43 sind Ergebnisse von Studien zusammengefasst, in denen bei verschiedenen Beschleunigern die Kopplungen zwischen W und Z Bosonen untersucht wurden. Die genaue Kenntnis dieser Kopplungen erlaubt es, weitreichende Rückschlüsse über den Gültigkeitsbereich des Standard-Modells zu ziehen, und bietet damit ein Fenster für neue Physik, das sogar bis zu

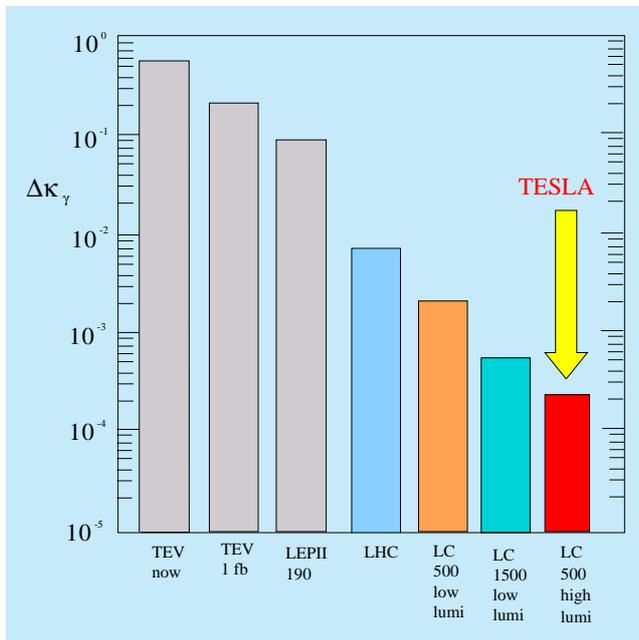


Abbildung 43: Vergleich der Genauigkeit, mit der W-Z Kopplungen an verschiedenen Beschleunigern gemessen werden können.

Energien oberhalb der Schwerpunktsenergie des Beschleunigers reicht. Aus der Abbildung ist der Vorteil eines Elektron-Positron-Linearbeschleunigers gegenüber anderen Maschinen klar ersichtlich.

An TESLA werden die bekannten Elementarteilchen allesamt in großer Zahl erzeugt. Damit können Präzisionsmessungen, zum Beispiel der Eigenschaften der W-Bosonen oder des top-Quark, durchgeführt werden, die in dieser Form an keiner anderen Maschine möglich sind. Dies wird unser Wissen über die Gültigkeit des Standard-Modells vertiefen.

Wie im vorigen Abschnitt ausgeführt, ist die Untersuchung des Higgs-Mechanismus eine der wesentlichen Messungen, die an TESLA durchgeführt werden soll. An TESLA ist es möglich, viele verschiedene Zerfallsmodi des Higgs-Bosons zu untersuchen. Dies ist in Abbildung 44 gezeigt, in der die Genauigkeit, mit der die Verzweigungsverhältnisse in verschiedene Endzustände bei TESLA gemessen werden können, gezeigt ist. Da die Zerfallswahrscheinlichkeit des Higgs-Bosons als proportional zur Masse der Zer-

fallsteilchen vorausgesagt wird, erlaubt diese Messung die detaillierte Prüfung der Vorhersagen.

Exotische Theorien sagen manchmal ganz besondere Signaturen beispielsweise für Zerfälle voraus und stellen damit eine sehr gute Möglichkeit dar, zu überprüfen, ob der vorgeschlagene Detektor den Anforderungen genügt. Ein Beispiel für eine solche Theorie ist die sogenannte GMSB-Theorie, die eine Alternative zum Higgs-Mechanismus des Standard-Modells vorschlägt. Eine der herausragenden Voraussagen dieses Modells ist, dass es hochenergetische Photonen geben muss, die nicht zum Ursprung der Reaktion, dem Wechselwirkungspunkt, zurückzeigen. Die Rekonstruktion dieser Photonen ist detailliert untersucht worden. In Abbildung 45 ist ein Ereignis im simulierten Detektor gezeigt, in dem zwei solcher Photonen aufgetreten und gefunden worden sind. Aus den Studien geht hervor, dass TESLA mit dem vorgeschlagenen Detektor auch solche exotischeren Theorien sehr gut überprüfen kann.

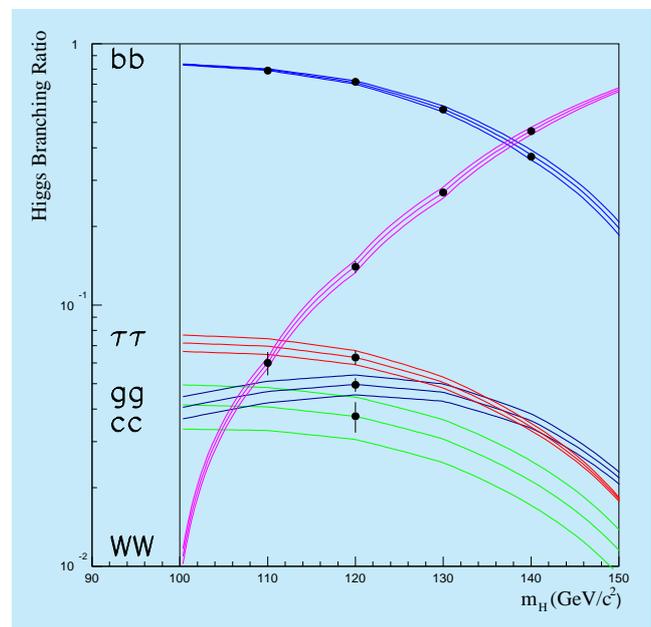


Abbildung 44: Verzweigungsverhältnisse des Higgs-Teilchens als Funktion seiner Masse. Die Kurven stellen Ergebnisse theoretischer Voraussagen dar, die Bänder geben die theoretischen Unsicherheiten wieder. Punkte mit Fehlerbalken sind Ergebnisse der simulierten Analyse am geplanten Detektor für TESLA.

Durch verhältnismäßig geringe Modifikationen kann TESLA bei einer Energie von etwa 91 GeV betrieben werden. Das erlaubt es, TESLA als eine „ $Z^0$ -Fabrik“ zu betreiben, in der innerhalb weniger Monate  $10^9$   $Z^0$ -Zerfälle aufgezeichnet werden können. Dies ist etwa hundertmal mehr als im gesamten Betrieb von LEP an einem der vier LEP-Experimente aufgezeichnet worden ist. Damit kann TESLA die Präzisionsmessungen von LEP nochmal deutlich verbessern und wesentliche Informationen über die Parameter des Standard-Modells liefern. Besonders interessant ist die Verbesserung der Genauigkeit, mit der die Kopplungsparameter der schwachen Wechselwirkung  $\mathcal{A}_e$  bzw.  $\mathcal{A}_b$  gemessen werden können. Hieraus kann der schwache Mischungswinkel  $\sin^2 \theta_W^{\text{eff}}$  mit einer Präzision von  $\pm 0.000013$  bestimmt werden, eine Größenordnung besser als bisher möglich. Diese Messungen liefern darüber hinaus interessante Informationen über die Konsistenz des Standard-Modells. Wenn ein Higgs-Teilchen existiert, und zum Zeitpunkt, wenn dies Experiment durchgeführt wird, gefunden worden ist, erlauben diese Messungen präzise Überprüfungen der Konsistenz des Standard-Modells.

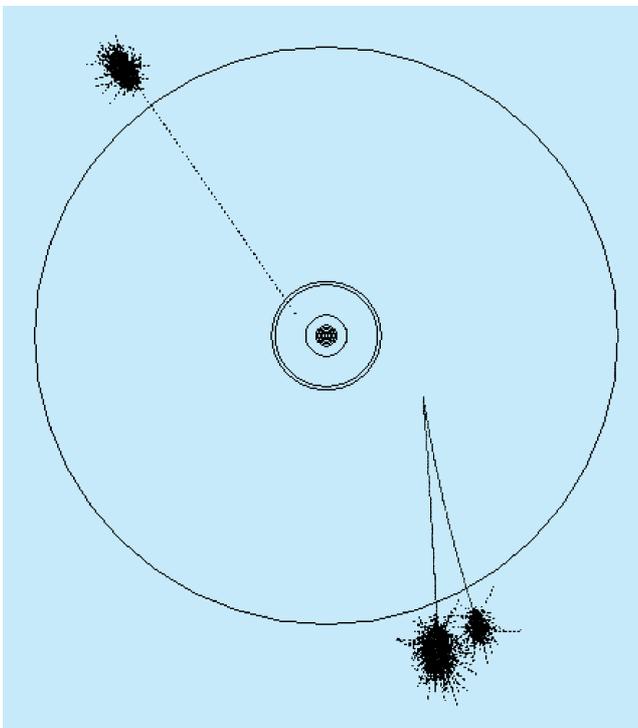


Abbildung 45: *Simuliertes Ereignis mit zwei Photonen, die nicht zum Wechselwirkungspunkt zurückzeigen.*

Physik an einem Linearbeschleuniger ist Präzisionsphysik. Die bisherigen Studien, die im Rahmen der ECFA/DESY Studie durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass ein Linearbeschleuniger durch seine Fähigkeit, Messungen mit hoher Präzision zu ermöglichen, erheblich dazu beitragen wird, den Energiebereich bis hin zu etwa 1 TeV zu verstehen.

### Detektorstudien

Einer der Aufträge, die der ECFA/DESY Studie auf den Weg gegeben wurden, ist es, einen Detektor für TESLA zu konzipieren. Dieser Detektor muss in der Lage sein, in der Umgebung, die durch die Maschinenparameter definiert ist, zu operieren und Messungen mit sehr hoher Präzision zu ermöglichen.

Im folgenden Abschnitt wird auf einige Themen, die in den letzten Monaten am DESY bearbeitet worden sind, näher eingegangen.

Zum ersten Mal wird bei TESLA Untergrund eine signifikante Rolle spielen, der durch die gegenseitige Wechselwirkung der beiden Strahlen hervorgerufen wird. Dieser Untergrund erzeugt eine sehr große Anzahl relativ niederenergetischer Photonen und Elektron-Positron Paare, die ein erhebliches Problem darstellen können. Durch geeignete Optimierung des Detektors in unmittelbarer Nähe des Strahlrohres konnte eine Konfiguration gefunden werden, die einerseits die Zahl der Untergrundteilchen, die in den Hauptteil des Detektors eindringen, auf ein erträgliches Maß reduziert, die aber andererseits eine Instrumentierung bis sehr dicht an das Strahlrohr heran ermöglicht. Dieser letzte Punkt ist speziell wichtig, weil dadurch der Bau eines Detektors mit sehr großer Akzeptanz möglich ist.

Die physikalischen Fragestellungen, die mit dem Detektor angegangen werden sollen, erfordern, dass geladene und neutrale Teilchen sehr genau vermessen werden können. Die gesamte Energie, die in einer Reaktion frei wird, muss exakt rekonstruiert werden können. Das bedeutet, dass der Detektor eine sehr feine Granularität haben muss, so dass einzelne Teilchen individuell rekonstruiert und verfolgt werden können.

Das Detektorkonzept sieht vor, dass ein System von Detektoren zur Vermessung geladener Spuren durch ein

Kalorimeter mit extrem guter Ortsauflösung ergänzt wird. Sowohl das Kalorimeter als auch die Spurkammersysteme befinden sich in einem solenoiden magnetischen Feld, das eine Stärke von 3–4 T haben wird.

Der Zentraldetektor ist eine große gasgefüllte TPC („Time Projection Chamber“), ergänzt von einem Vertexdetektor (VTX), der unmittelbar in der Umgebung der Wechselwirkungszone Messungen mit hoher Genauigkeit durchführen kann, sowie einem System von Silizium-Detektoren (SIT), die zwischen dem Vertexdetektor und der TPC angeordnet sind. Als ein Beispiel ist in Abbildung 46 die Impulsauflösung gezeigt, die im Detektor erreicht wird. Ebenfalls gezeigt ist die Zielvorgabe, die im Wesentlichen durch die benötigte Massenauflösung in der Rekonstruktion von Z-Bosonen gegeben ist. Deutlich ist, dass erst die Kombination verschiedener Detektorelemente, wie in der Zeichnung angedeutet, eine ausreichende Präzision ermöglicht.

Bereits im Abschnitt über die physikalischen Studien wurden in Abbildung 44 die Verzweungsverhältnisse für die verschiedenen Zerfallsarten des Higgs-Bosons gezeigt. Die Rekonstruktion der Zerfallsprodukte hängt wesentlich von der hervorragenden Auflösung des Vertexdetektors ab, der es erlaubt, Teilchen mit Lebensdauern unter 1 ps gut nachzuweisen.

Verschiedene Entwürfe eines Kalorimeters sind im Rahmen der Studie diskutiert worden. Allen ist gemeinsam, dass der größte Teil des Gerätes innerhalb der Spule angeordnet ist, um eine möglichst gute Energieauflösung zu erreichen. Für den elektromagnetischen Teil ist ein Kalorimeter aus Wolfram Absorbern mit Silizium-Detektor Auslese vorgesehen. Diese Technologie bietet ein Optimum an Segmentierung sowohl transversal als auch longitudinal zur Teilchenrichtung. Gleichzeitig kann die Auslese so kompakt gehalten werden, dass kaum Löcher in der Akzeptanz des Kalorimeters entstehen. Das Kalorimeter soll etwa 30 Strahlungslängen im elektromagnetischen Teil haben, oder in etwa eine hadronische Wechselwirkungslänge.

Hinter dem elektromagnetischen Kalorimeter, aber noch innerhalb der Spule, ist ein hadronisches Kalorimeter vorgesehen. Hier ist geplant, die deponierte Energie mit Szintillationszählern zu messen, die mit Hilfe von klaren Fasern ausgelesen werden.

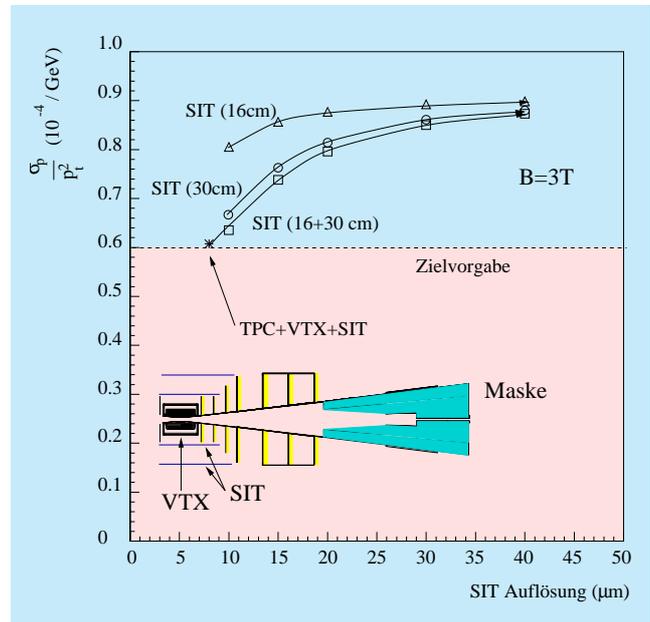


Abbildung 46: Impulsauflösung für verschiedene Zentraldetektorsysteme (siehe Legende) als Funktion der Auflösung des SIT Detektors.

Außerhalb der Spule befindet sich im Wesentlichen das Eisen, welches den magnetischen Fluss der Spule zurückführt. Es ist mit einem einfachen System von Kammern instrumentiert und dient als Kalorimeter und als Myon-Nachweissystem.

Ein wesentlicher Vorteil eines Elektron-Positron-Beschleunigers, verglichen mit einem Hadron-Beschleuniger, ist es, dass die Ereignisse relativ sauber sind und dass es kaum Ereignisse gibt, die nicht interessant sind. Dies wird im Entwurf des Trigger-Systems für den Detektor berücksichtigt. Überspitzt formuliert, soll auf einen Trigger im klassischen Sinne verzichtet werden und jedes Ereignis zunächst aufgezeichnet werden. Die Entscheidung, welche der Ereignisse letztendlich in der Physik-Analyse verwendet werden, wird erst in einer Rechnerfarm getroffen, in der bereits die vollständige Rekonstruktion der Ereignisse zur Verfügung steht.

Dieses Konzept hat eine Reihe bestechender Vorteile. Es erlaubt es, das Experiment totzeitfrei zu betreiben. Damit kann die gesamte Luminosität, die von der Maschine geliefert wird, ausgenutzt werden. Es erlaubt einen außerordentlich flexiblen Betrieb, in dem schnell auf unerwartete Ereignisse reagiert werden kann, ohne

dass größere Modifikationen der Hardware notwendig sind. Ein solches System ist auch relativ einfach skalierbar, sollte die Luminosität der Maschine größer sein als ursprünglich angenommen.

Abschätzungen haben ergeben, dass ein solches System zwar eine Herausforderung für die heutige Technologie darstellt, aber durchaus realisierbar ist. Sowohl erwartete Datenmenge als auch Rechneranforderungen sind ähnlich dem, was heute von bereits genehmigten Experimenten wie HERA-B oder am LHC geplant ist.

Am DESY und an anderen an der Studie beteiligten Instituten haben erste Untersuchungen begonnen, um die

technische Machbarkeit verschiedener Detektorkomponenten zu untersuchen. In Hamburg wird im Moment eine Test-TPC gebaut und betrieben, mit der eine neuartige Auslesetechnologie überprüft wird, die es ermöglichen soll, eine TPC im Dauerbetrieb zu betreiben. Bisher war es notwendig, solche Detektoren regelmäßig „auszutakten“, um eine Akkumulation zu großer Ladungsmengen im Detektorvolumen zu verhindern. Diese Studien sollen helfen, herauszufinden, wo noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sind, um einen realistischen Detektor vorschlagen zu können, der den hohen Anforderungen genügt.

# Theoretische Physik

Sprecher: W. Buchmüller

**Theoretische Untersuchungen zur Teilchenphysik haben sich auf folgende Schwerpunkte konzentriert: Quantenchromodynamik, Flavor-Physik der schweren Quarks und Neutrinos, Higgs-Mechanismus und Supersymmetrie. Darüber hinaus wurden Probleme der Gittereichtheorien gelöst. Ferner sind mathematisch-physikalische Fragestellungen der Gravitation und Stringtheorien verfolgt worden. Diese Aufgabenstellungen wurden von der DESY Theorie-Gruppe sowie dem II. Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg behandelt.**

## Quantenchromodynamik (QCD)

Die HERA Experimente zur tiefunelastischen Elektron-Proton-Streuung werfen eine große Zahl von komplexen theoretischen Problemstellungen in der QCD auf. Zu ihnen gehören Instanton-Effekte, diffraktive Streuprozesse und die exklusive Teilchenproduktion, deren Untersuchungen im vergangenen Jahr systematisch fortentwickelt wurden. Ferner konnte die quantitative Beschreibung der Paarerzeugung von top-Quarks an der Schwelle in  $e^+e^-$ -Kollisionen wesentlich verbessert werden.

## Instanton-Effekte

Instantonen stellen einen grundlegenden Aspekt der QCD dar. Als nicht-störungstheoretische Fluktuationen der Eichfelder, mit typischer Ausdehnung von etwa 0.5 fm, spielen sie eine wichtige Rolle im Übergangsbereich zwischen der partonischen und der hadronischen Beschreibung der starken Wechselwirkung. Trotz der zahlreichen theoretischen Hinweise auf die Bedeutung von Instantonen für ein Verständnis der Hadron-Phänomenologie war bisher deren direkter experimen-

teller Nachweis nicht möglich. Es stellt sich jedoch heraus, dass sich eine Manifestation von Instantonen bei kleinen Abständen für die experimentelle Suche ausnutzen lässt: Instantonen induzieren partonische Vielteilchenprozesse, die im Rahmen der üblichen QCD-Störungstheorie verboten sind. Für die Entdeckung solcher Prozesse bietet sich in der tiefunelastischen Streuung bei HERA eine einzigartige Möglichkeit. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass in diesem kinematischen Bereich sowohl die Rate als auch eine charakteristische Ereignis-Signatur theoretisch vorhergesagt werden kann [DESY 99-136]. Die Rate liegt im messbaren Bereich. Die wichtigsten Signaturen sind ein „Feuerball“-artiger Endzustand mit einer sehr hohen Zahl von Teilchen, einschließlich K-Mesonen und  $\Lambda$ -Hyperonen, sowie einer hohen Transversalenergie.

Die systematische Untersuchung des Entdeckungspotentials für solche Ereignisse bei HERA wurde sowohl in theoretischer als auch in phänomenologischer Richtung intensiv fortgeführt [DESY 98-200, 201, 99-062, 067, 136, 180]. Wichtige quantitative Information über den Gültigkeitsbereich der theoretischen Voraussetzungen konnte aus einer neuen Gitter-Simulation gewonnen werden [DESY 98-201]. Zusammen mit Experimentalphysikern wurden Suchstrategien entwickelt und Modellabhängigkeiten der Hadronisierung des Endzustands untersucht [DESY 99-067]. Eine erheblich verbesserte Version des Simulationsprogramms QCDINS für Instanton-Ereignisse wurde erstellt und ausführlich dokumentiert [DESY 99-180].

## Diffraktive Streuung und exklusive Prozesse

Die tiefunelastische Elektron-Proton-Streuung bei HERA ermöglicht die Untersuchung der Struktur des

Protons bei kleinen Werten des Bjorkenschen Skalenparameters  $x$ , das heißt unterhalb von  $10^{-2}$ . Die HERA-Experimente haben gefunden, dass in diesem kinematischen Bereich die Parton-Dichten stark anwachsen. Damit kann eine Reihe interessanter nicht-perturbativer Phänomene der QCD im Detail studiert werden. Hierzu gehören diffraktive Streuprozesse, bei denen das Proton fast unbehelligt im Strahlrohr verschwindet. Die gemessenen Strukturfunktionen können quantitativ beschrieben werden durch Streuung an Quarks und Gluonen im Proton, deren Dichten durch diffraktive Parton-Verteilungen gegeben sind, in Übereinstimmung mit einem Faktorisierungstheorem der QCD. Das physikalische Bild im Ruhesystem des Protons ist die Streuung von Farb-Dipolen an den Farbfeldern im Proton. Damit ist ein vergleichbares Verständnis diffraktiver und inklusiver Streuprozesse erreicht [DESY 99-076, 080]. Ein qualitatives Verständnis diffraktiver Prozesse, und allgemein hadronischer Endzustände, ist möglich durch Berücksichtigung „weicher Farbwechselwirkungen“ in Monte Carlo-Programmen zur Berechnung von Streuprozessen [DESY 99-009, DESY-PROC-1999-02]. Von Bedeutung für die QCD sind neben den Strukturfunktionen auch exklusive Prozesse. Von besonderem Interesse ist der virtuelle Compton-Prozess, der durch verallgemeinerte Parton-Verteilungen beschrieben wird, die den Impulsübertrag an das gestreute Proton berücksichtigen [DESY 98-172, 99-025]. Dieser Prozess liefert ebenfalls wichtige Information über die Spinstruktur des Protons [DESY 98-198]. Auch die Upsilon-Photoproduktion bei HERA ist abhängig von den verallgemeinerten Parton-Verteilungen [DESY 98-156].

### top-Quark

Die Paarerzeugung von top-Quarks in der Nähe der Schwelle in  $e^+e^-$ -Kollisionen, welche für eine präzise Bestimmung der Masse der top-Quarks von großer Bedeutung ist, wurde unter Berücksichtigung der QCD-Korrekturen theoretisch weiter analysiert. In diesem Zusammenhang wurde eine neue Definition der top-Quark Masse vorgeschlagen, die es erlaubt, eine verbesserte Konvergenz der Störungstheorie zu erzielen. Mit dieser Methode wurde eine theoretische Genauigkeit von 200 MeV für die top-Quark Masse abgeschätzt [DESY 99-047]. Der Beitrag des Axialvektor-Stroms zum Wirkungsquerschnitt für die Paarerzeugung von top-Quarks

wurde berechnet [DESY 99-031]. Mit Hilfe dieses Effektes lässt sich die Lebensdauer des top-Quarks präzise messen.

## Flavor-Physik

Bedeutende experimentelle Programme zum Nachweis der CP-Verletzung im B-Sektor sowie die Beobachtung von Neutrino-Oszillationen haben theoretischen Analysen von Quark-Mischungen und Untersuchungen von Strukturen des Neutrino-Sektors starke neue Impulse gegeben, die die theoretische Flavor-Physik im letzten Jahr wesentlich gefördert haben. Von hohem physikalischem Interesse ist auch die Verbindung der Neutrino-Physik mit der Kosmologie.

## B-Mesonen

Die Messung der CP-Asymmetrien in B-Meson Zerfällen steht im Mittelpunkt des HERA-B Experiments bei DESY sowie der vor kurzem angelaufenen Experimente bei SLAC (USA) und KEK (Japan) (sogenannten B-Mesonfabriken) und bei Fermilab (USA). Die Unitarität des Standard-Modells führt zu strikten Konsistenzbedingungen für die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrixelemente, welche als Dreiecke im Quarkflavor-Parameter Raum dargestellt werden können. Die Winkel des Unitaritätsdreiecks,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , sind für die Präzisionsmessung der Quarkflavor-Übergänge sowie der CP-Asymmetrien in B-Meson Zerfällen von zentraler Bedeutung. Gibt es neue Physik jenseits des Standard-Modells, so erwartet man eine Verschiebung der Spitze des Dreiecks oder sogar neue topologische Konfigurationen. Das theoretische Profil des wichtigsten Unitaritätsdreiecks wurde innerhalb des Standard-Modells und in supersymmetrischen Theorien mit Berücksichtigung der QCD-Korrekturen untersucht [DESY 99-042, 083]. Die supersymmetrischen Effekte könnten sich durch genaue Messungen der Winkel  $\alpha$  und  $\gamma$  bemerkbar machen. Auf der Suche nach neuer Physik sind auch die seltenen Zerfälle des bottom-Quarks,  $b \rightarrow sy$  und  $b \rightarrow sl^+l^-$ , potentiell von großer Bedeutung. Ein Anfang in dieser Richtung ist durch die Experimente CLEO, ALEPH und CDF gemacht worden. Die exklusiven seltenen B-Zerfälle sind experimentell leichter zugänglich, sind

aber mit theoretischen Unsicherheiten behaftet. Es wurden theoretisch verbesserte Berechnungen der Formfaktoren für die Zerfälle  $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$  ausgearbeitet. Mit Hilfe dieser Formfaktoren wurden das Dilepton-Massenspektrum in diesen Zerfällen und die Vorwärts-Rückwärts-(FB-)Asymmetrie in  $B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-$  berechnet. Als besonders interessant hat sich die Bestimmung der Nullstelle der FB-Asymmetrie erwiesen, die weitgehend von Formfaktoren unabhängig ist, und daher für einen Präzisionstest des Standard-Modells in Flavorübergängen sehr gut geeignet ist. Eine Verschiebung der Nullstelle der Asymmetrie weg vom Standard-Modellwert würde einen Hinweis auf neue Physik liefern. Das Massenspektrum und die FB-Asymmetrie sowie die Nullstelle wurden im Standard-Modell und in supersymmetrischen Theorien untersucht [DESY 99-146].

## Neutrino-Physik und Kosmologie

Die Neutrino-Physik steht aufgrund der Resultate des SuperKamiokande-Experiments gegenwärtig auch im Zentrum des theoretischen Interesses. Hierzu gehören die Phänomenologie der atmosphärischen Neutrino-Oszillationen und das Verständnis der Neutrino-Massenmatrix [DESY 98-164]. Theoretisch favorisiert wird eine große Mischung zwischen Myon- und Tau-Neutrino. Im Rahmen vereinheitlichter Theorien stellt sich damit die Frage nach dem Zusammenhang mit Flavor-verändernden hadronischen Prozessen [DESY 99-169]. Im Rahmen supersymmetrischer Theorien wird eine relativ große Wahrscheinlichkeit für den radiativen Zerfall eines Myons in ein Elektron vorhergesagt (größer als  $10^{-14}$ ), was in den nächsten Jahren experimentell überprüft werden kann [DESY 99-021].

Die kosmologische Baryon-Asymmetrie kann quantitativ erklärt werden durch den Zerfall schwerer Majorana-Neutrinos im frühen Universum. Die beobachtete Asymmetrie ergibt sich aus Eigenschaften der Neutrino-Massenmatrix. Die gegenwärtigen experimentellen Hinweise aus dem SuperKamiokande Experiment stimmen sehr gut mit dieser Hypothese überein [DESY 99-044]. In supersymmetrischen Theorien ergeben sich wichtige Einschränkungen an die Temperatur, bei der die Baryon-Asymmetrie erzeugt wird, durch die ebenfalls stattfindende Erzeugung von Gravitinos [DESY 98-186].

## Higgs-Mechanismus und Supersymmetrie

Der Higgs-Mechanismus zur Erzeugung von Teilchenmassen und die supersymmetrische Erweiterung des Standard-Modells bilden zentrale Problembereiche der Hochenergiephysik, die mit Hilfe der nächsten Generation von Protonen- und  $e^+e^-$ -Linearcollidern gelöst werden können.

In supersymmetrischen Theorien ist der Higgs-Sektor wesentlich komplexer als im Standard-Modell. In der minimalen supersymmetrischen Theorie wird ein Quintett von neutralen und geladenen Higgs-Teilchen vorhergesagt. Für die Masse des leichtesten neutralen Teilchens ist eine obere Schranke von 140 GeV abgeleitet worden. Die Bestimmung dieser Masse aus den Fundamentalparametern der Theorie ist bis zur Zwei-Schleifen Ordnung analytisch ausgeführt worden [DESY 98-194, 99-012, 120]. Dies erlaubt Hochpräzisionstests des Mechanismus für die elektroschwache Symmetriebrechung im GigaZ Mode von TESLA, in welchem der Collider mit sehr hoher Luminosität auf der Z-Resonanz läuft [DESY 99-117]. Ein kompliziertes Problem ist die Suche nach geladenen Higgs-Teilchen an Hadron-Beschleunigern, falls sie in Zerfällen von top-Quarks wegen zu hoher Masse nicht erzeugt werden können. Die Wirkungsquerschnitte für die Produktion einzelner sowie von Paaren dieser Teilchen und die assoziierte Produktion von Higgs- und W-Bosonen am LHC sind zu diesem Zwecke berechnet worden [DESY 99-132, 112, 121].

Ein ähnliches Bild bietet die Analyse von neutralen Higgs-Paaren. Die Suche nach solchen Ereignissen wird am LHC sehr schwierig sein für Parameterbereiche außerhalb der Higgs-Kaskadenzerfälle [DESY 99-033]. Hingegen können große Parameterbereiche an einem  $e^+e^-$ -Collider hoher Luminosität überdeckt werden, so dass trilineare Selbstkopplungen der neutralen Higgs-Teilchen in supersymmetrischen Theorien experimentell studiert werden können [DESY 99-001, 171]. Damit kann eine solche Anlage wesentliche Elemente zur Rekonstruktion des Selbstwechselwirkungs-Potentials der Felder bereitstellen, auf dem der Higgs-Mechanismus gründet.

Falls, trotz starker indirekter Hinweise, der Higgs-Mechanismus nicht in der Natur realisiert ist, müssen

die schwachen W-Bosonen bei Energien von etwa 1 TeV stark wechselwirken. Die Streuamplituden können in diesem Bereich theoretisch vorhergesagt werden. Diese Vorhersagen, die auf der spontanen Brechung von chiralen Symmetrien in neuen stark-wechselwirkenden Sektoren basieren, können an TeV  $e^+e^-$ -Linearcollidern präzise getestet werden [DESY 99-111].

### Supersymmetrie

Charginos, die supersymmetrischen Partner von W-Bosonen und geladenen Higgs-Bosonen, können in Proton-Collidern [DESY 99-055, 046] und  $e^+e^-$ -Collidern [DESY 98-136, 175] paarweise erzeugt werden. Die Ausnutzung polarisierter Elektron/Positron-Strahlen erlaubt die vollständige Rekonstruktion der Fundamentalparameter des Chargino-Sektors: Massenparameter, Mischungswinkel und Kopplungen. Dies sind wesentliche Elemente für die experimentelle Untersuchung der Supersymmetriebrechung, deren Mechanismus bisher noch nicht theoretisch geklärt werden konnte.

### Gittereichtheorien

Die Formulierung von Feldtheorien auf dem Gitter bietet Zugang zur Lösung vieler physikalischer Probleme in nicht-störungstheoretischen Bereichen. Ein zentraler Bereich ist dabei die Struktur von abelschen und nicht-abelschen Eichfeldtheorien, insbesondere die chiralen Symmetrien, deren Verständnis zur Beschreibung der Hadronen in der QCD essentiell ist. Eine Fülle weiterer Problemstellungen öffnet sich, wenn Aspekte möglicher Theorien jenseits des Standard-Modells analysiert werden.

### Chirale Gittereichtheorien

Chirale Eichtheorien gelten zu Recht als relativ schwieriger Fall unter den phänomenologisch relevanten Feldtheorien. Schon in der Störungstheorie führen chirale Anomalien zu einer Verletzung der Eichinvarianz, es sei

denn, man hätte ein sogenanntes anomaliefreies Multiplett von Weyl-Fermionen gewählt. Bis vor kurzem galt es als ausgemacht, dass sich solche Theorien nicht regularisieren lassen, ohne die Eichsymmetrie zu brechen. Ihre mathematische Konsistenz konnte deswegen nur zu allen Ordnungen der Störungstheorie bewiesen werden. Darüber hinaus weiß man, dass in manchen Fällen außerhalb dieses Rahmens mit zusätzlichen Komplikationen, den „globalen Anomalien“, zu rechnen ist. Eine überraschende Entdeckung im letzten Jahr war, dass sich die chirale Symmetrie in der Gittereichtheorie erhalten lässt, ohne andere fundamentale Prinzipien aufgeben zu müssen. Die weitere Entwicklung führte dann zu einer Formulierung von chiralen Eichtheorien auf dem Gitter mit exakter Eichinvarianz. Für alle abelschen Eichgruppen hat man eine komplette Konstruktion [DESY 98-180] und damit den Beweis, dass sich diese Theorien außerhalb der Störungstheorie konsistent formulieren lassen. Die Formulierung lässt sich ohne weiteres auf nicht-abelsche Eichtheorien verallgemeinern, aber die Frage der exakten Kürzung der lokalen Anomalie auf dem Gitter ist in diesem Fall zur Zeit noch nicht vollständig geklärt. Immerhin konnte die Frage auf ein Problem der lokalen Kohomologie von klassischen Gittereichfeldern zurückgeführt werden, und es scheint sehr wahrscheinlich, dass dieses gelöst werden kann [DESY 99-040, CERN-TH/99-290]. Die oben erwähnten globalen Anomalien können im Prinzip in allen chiralen Eichtheorien auftreten. Ein besonders einfacher und oft studierter Fall sind die Theorien mit Eichgruppe  $SU(2)$  und beliebigen Multiplikts von linkshändigen Fermionen. Die Kürzung der lokalen Anomalie ist in diesen Theorien automatisch, auch auf dem Gitter, weil die Darstellungen der  $SU(2)$  alle reell oder pseudo-reell sind. Die Gitterformulierung erlaubt dann eine Diskussion der globalen Anomalien in einem mathematisch wohldefinierten Rahmen. Es stellt sich dabei heraus, dass die früher auf der Basis von semi-klassischen Argumenten hergeleiteten Anomalien auch auf dem Gitter vorhanden sind [DESY 99-137].

### Supersymmetrie auf dem Gitter

Die nicht-störungstheoretischen Eigenschaften supersymmetrischer Quanten-Eichfeldtheorien sind für das Verständnis der Supersymmetrie-Brechung von entscheidender Bedeutung. Der Grundstein solcher Theo-

rien ist die supersymmetrische Yang-Mills-(SYM-) Theorie. In einer Kollaboration mit dem Institut für Theoretische Physik I der Universität Münster wurden die SYM-Theorien für die Eichgruppen  $SU(2)$  und  $SU(3)$  untersucht [DESY 99-135, 138]. Für die numerische Simulation am John von Neumann-Institut für Computing (NIC) in Jülich wurde der multi-bosonische Algorithmus im zwei-Schritt Verfahren eingesetzt. Dieser Algorithmus arbeitet sehr effektiv auch bei sehr kleinen Fermion-Massen (in diesem Fall Gaugino-Massen). In der SYM-Theorie mit Eichgruppe  $SU(2)$  wurde zuerst die spontane Brechung der diskreten chiralen Symmetrie untersucht [DESY 98-165]. Die Existenz zweier Grundzustände bei Gaugino-Masse gleich null wurde bestätigt. Das Confinement von elementaren Farbladungen wurde beobachtet und die Stringspannung bestimmt. Das Massenspektrum der leichtesten gebundenen Zustände wurde analysiert [DESY 99-029]. Die erwartete Struktur der supersymmetrischen Multipletts wurde nicht gefunden. Das lässt die Frage einer Anomalie in der Supersymmetrie offen.

## Fermion-Algorithmen

Für die numerische Simulation fermionischer Quantenfeldtheorien wurde ein neuer Algorithmus entwickelt [DESY 99-036, 127, 170]. Es handelt sich dabei um den multi-bosonischen Algorithmus im zwei-Schritt-Verfahren, in dem der Einfluss der Fermionen auf die Bosonen mit Hilfe zusätzlicher Bosonfelder beschrieben wird. Im ersten Schritt wird die Determinante, die die fermionischen Effekte zusammenfasst, nur in einer relativ groben Näherung dargestellt. Im zweiten „Korrekturschritt“ wird die Abweichung stochastisch korrigiert. Außer für die supersymmetrische Yang-Mills-Theorie, wo der Algorithmus zuerst eingesetzt wurde, wurde in der GRAL-Kollaboration mit der Universität Wuppertal auch für die QCD ein Simulationsprogramm entwickelt. In Zusammenarbeit mit Gruppen an der Universität Swansea und der Universität Glasgow wurde der Algorithmus in QCD mit  $SU(2)$ -Farbe und Quarks in der adjungierten Darstellung bei nicht-verschwindender Quark-Dichte verwendet. In diesem Fall ist die Überlegenheit des neuen Algorithmus gegenüber herkömmlichen Fermion-Algorithmen besonders

deutlich, weil auch die Änderung des Vorzeichens der Fermion-Determinante richtig wiedergegeben wird.

## Gravitation und Stringtheorien

Von zentraler physikalischer Bedeutung ist die Verbindung der Gravitation mit der Teilchenphysik. Neben methodischen Untersuchungen zu Quantenfeldtheorien in gekrümmten Räumen steht die Frage einer string-theoretischen Lösung im Mittelpunkt intensiver Untersuchungen.

In der Arbeitsgruppe „Mathematische Physik und Quantenfeldtheorie“ wurde die Renormierung von Quantenfeldtheorien in äußeren Gravitationsfeldern untersucht [DESY 99-032]. Mit Methoden der mikrolokalen Analysis konnte gezeigt werden, dass die Ultraviolettprobleme in der Störungstheorie wie im Minkowski-Raum behandelt werden können. Wesentlich war die Weiterentwicklung [DESY 99-168] einer auf Bogoliubov, Epstein und Glaser zurückgehenden Version der Renormierung, die es gestattet, das Infrarotproblem in der störungstheoretischen Konstruktion der Observablen-Algebren vollständig zu vermeiden. Die Ausdehnung dieser Methode auf nichtabelsche Eichtheorien war ein Schwerpunkt der Aktivitäten [DESY THESIS-1999-032].

Einen weiteren Arbeitsschwerpunkt bildete die Stringtheorie und insbesondere die darin auftretenden solitonischen Objekte. Diese sogenannten D-Branen und deren dynamische Eigenschaften spielen eine zentrale Rolle für das Verständnis nichtstörungstheoretischer Aspekte von Stringtheorien. Durch Vergleiche mit neuen Konstruktionen der Quantisierungstheorie konnte gezeigt werden, dass die Dynamik von D-Branen im Rahmen der Nichtkommutativen Geometrie analysiert werden sollte [DESY 99-013, 039]. Die entwickelten Methoden erlaubten dabei zum ersten Mal auch exakte Aussagen über entsprechende Eigenschaften von D-Branen in gekrümmten Hintergründen [DESY 99-104]. Erweiterungen und Anwendungen auf die Analyse von D-Branen in Calabi-Yau Kompaktifizierungen sind in Vorbereitung.

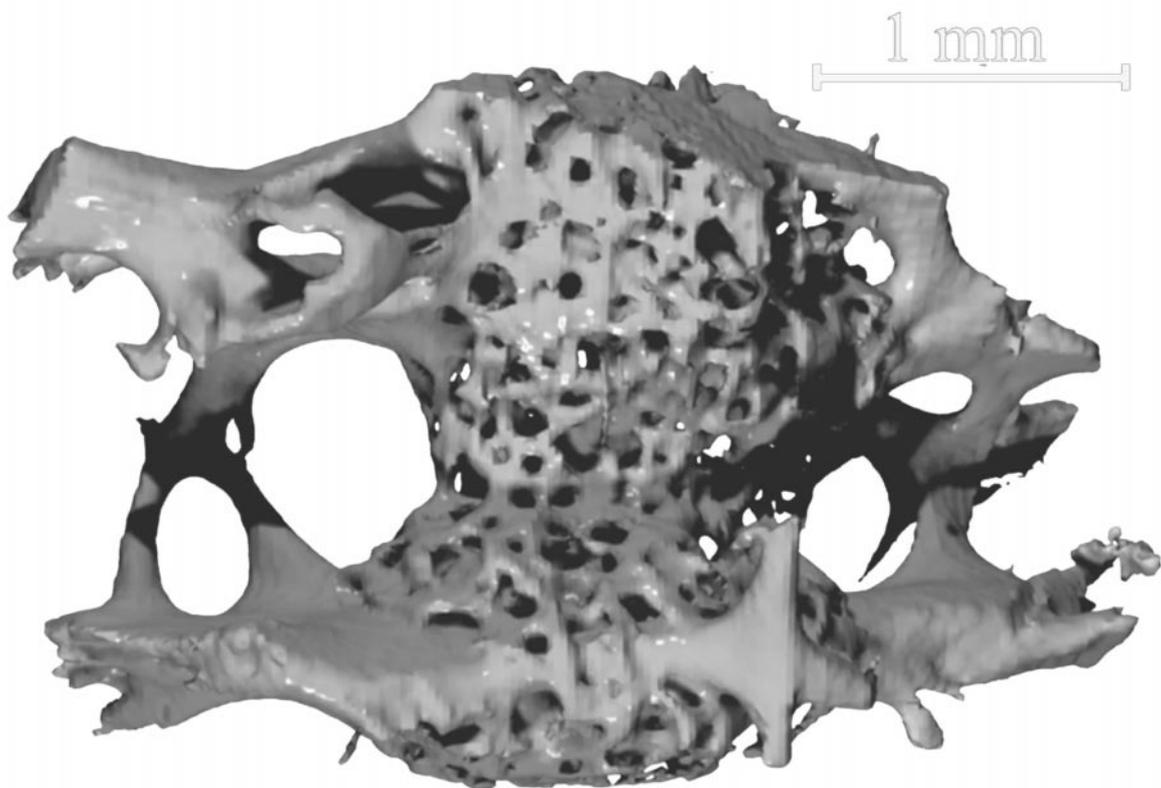


Abbildung 47: Röntgen-Mikrotomographie eines Mikrokallus in der Beckenkammbiopsie eines an renaler Osteopathie erkrankten Patienten.

# 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 (Abb. 47) eingesetzt. Dabei wird das 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.**

DORIS III wird mit Positronen bei einer Energie von 4.5 GeV und einem Anfangsstrom von 150 mA im 5-Bunch-Modus betrieben. Die Gesamtverfügbarkeit lag 1999 bei 93% (Abb. 48). Typische Strahllebensdauern waren etwa 12 Stunden am Beginn und 22 Stunden am Ende einer zehnstündigen Betriebsperiode. DORIS war vom 25. Januar bis 20. Dezember 1999 in Betrieb. Die 5900 Stunden, die für die Nutzer eingeplant waren, gliederten sich in sieben Blöcke von vier bis fünf Wochen, getrennt durch jeweils eine Woche für Wartung. Um DORIS auch während der Nutzungszeit optimieren zu können, wurde in jedem Block am zweiten, dritten und vierten Donnerstag eine achtstündige Maschinenschicht eingeschoben.

Für spezielle zeitaufgelöste Experimente gab es Schichten mit reduzierter Bunchzahl für etwa 20% der Be-

triebszeit. Am Speicherring PETRA konnten 1999 etwa 1800 Stunden parasitäre Strahlzeit genutzt werden.

Neue Netzgeräte für die Korrekturmagnete wurden 1999 in DORIS installiert und die Strahllageregelung wurde in das neue PC-Kontrollsystem integriert. Dadurch konnte die Stabilität der geregelten Strahlen deutlich verbessert werden. Weitere Verbesserungen wurden durch eine kombinierte Berücksichtigung von Strahllage-Monitoren in verschiedenen Strahlrohren erreicht. Um die horizontalen Strahllage-Schwankungen durch die Bewegung der Quadrupole zu reduzieren, sollen die betreffenden Vakuumkammern in den DORIS-Bögen durch neue Kammern ersetzt werden, die von den Quadrupolen entkoppelt sind. Dies wird im Herbst-Shutdown 2000 erfolgen.

Die wachsende Zahl von Synchrotronstrahlungsnutzern ist darauf angewiesen, Synchrotronstrahlung von DORIS und PETRA langfristig nutzen zu können. Deshalb wird DESY diese Ringe auch während des Baus und der Inbetriebnahme von TESLA – dem geplanten Linearbeschleuniger für die Teilchenphysik mit integrierten Freie-Elektronen-Lasern (FEL) für den Röntgenbereich – betreiben. Eine Arbeitsgruppe wurde ins Leben gerufen mit der Aufgabe, die Emittanz von DORIS mindestens um eine Größenordnung zu verbessern und dabei aber die Position der zehn Wiggler-Strahlführungen unverändert zu lassen. Die Ergebnisse dieser Arbeitsgruppe werden mit der Nutzerschaft diskutiert werden. Wichtige Aspekte in diesem Zusammenhang sind die Frage der Kosten, die Anzahl der benötigten Strahlführungen und die Länge des Shutdowns, in dem dieser Umbau stattfinden soll.

Nach Abschluss des jetzigen Messprogramms an HERA könnte der Speicherring PETRA zu einer dedizierten Synchrotronstrahlungsquelle werden. Deshalb wurde eine zweite Arbeitsgruppe bei DESY eingesetzt, die das Potential von PETRA als Synchrotronstrahlungsquelle bei 6 GeV untersuchen soll. Mit ei-

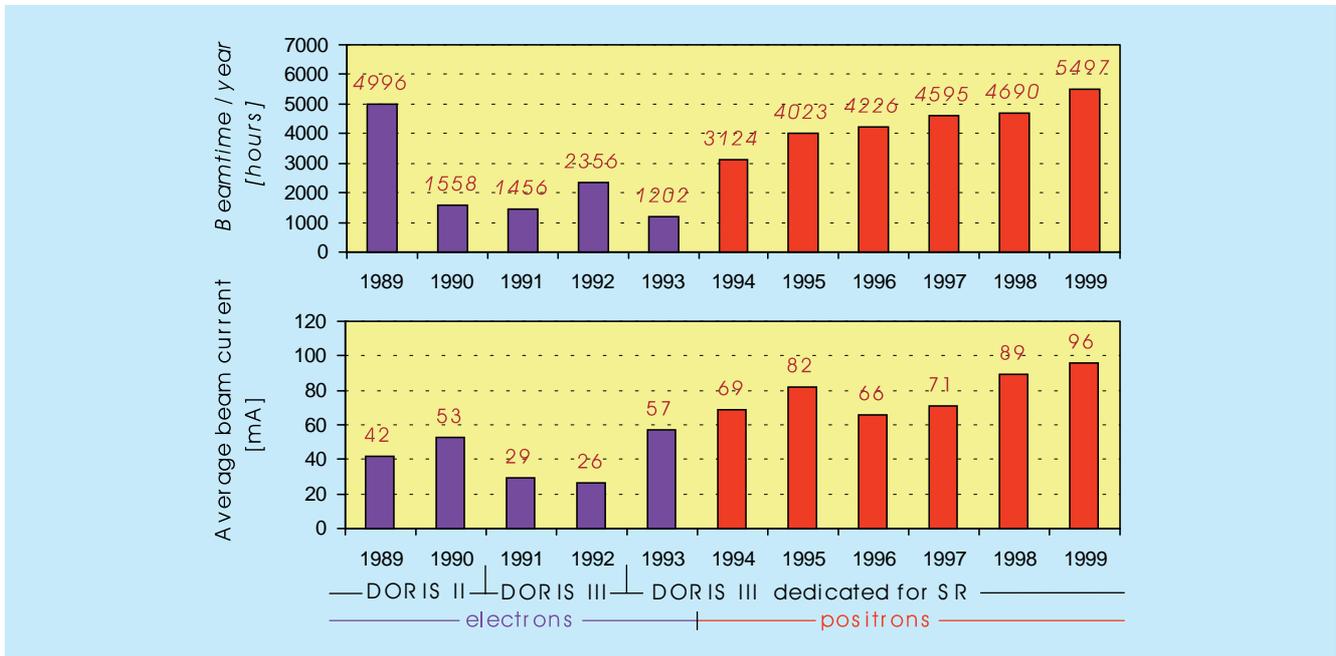


Abbildung 48: Strahlzeit in Stunden und mittlerer Strahlstrom in DORIS über die Jahre 1989 bis 1999.

ner optimierten Magnetanordnung des 2.3 km langen Ringes könnte man Strahleigenschaften erreichen, die denen der jetzigen Maschinen der dritten Generation überlegen wären.

1999 wurde mit dem Einfahren des neuen Linearbeschleunigers mit supraleitenden Kavitäten und des Freie-Elektronen-Lasers für den VUV- und weichen Röntgenbereich begonnen. Alle Komponenten einschließlich der Undulatoren mit den Vakuumkammern und der Strahldiagnose wurden installiert. Im August konnte das erste spontane Spektrum beobachtet werden. Eines der Ziele wurde bereits erreicht. Eines der LINAC-Kryomodulen mit insgesamt acht 9-zelligen supraleitenden Niob-Kavitäten konnte im normalen Betrieb einen Gradienten von 22.6 MeV pro Meter erreichen. Für das TESLA Linearbeschleuniger-Projekt wird ein Gradient von 22 MeV pro Meter benötigt. Im Augenblick konzentrieren sich die Arbeiten darauf, die Stabilität der LINAC-Komponenten zu verbessern und das Anwachsen der Emittanz des Elektronen-Bunches während des Transports durch den LINAC zu minimieren. Das Ziel ist, in einem „proof of principle“ Experiment Verstärkung des SASE-FELs bei einer Wellenlänge von etwa 100 nm zu erreichen.

Der Tunnel für die zweite Ausbauphase des VUV-FELs wurde im Rohbau fertiggestellt und der Aufbau der Experimentierhalle geht zügig voran. In beiden Bauten soll die EXPO 2000 Ausstellung vom 1. Juni bis zum 31. Oktober stattfinden.

Wichtige Fortschritte wurden bei der Ausarbeitung des Technischen Design Reports für TESLA gemacht, der die technische Planung und den wissenschaftlichen Hintergrund sowohl der Teilchenphysik als auch der Forschung mit Synchrotronstrahlung beinhaltet sowie den Zeitplan und Kostenabschätzungen.

Um die Aktivitäten der an einer neuen Generation von Synchrotronstrahlungsquellen interessierten Institutionen zu koordinieren, wurde ein internationales Netzwerk gegründet, das alle Laboratorien verbindet, die an der Entwicklung und der Nutzung eines Röntgen Freie-Elektronen-Lasers im 1 Ångström-Bereich mitarbeiten wollen. Im politischen Bereich wurde vom Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Entscheidung getroffen, den deutschen Wissenschaftsrat zu bitten, das TESLA-Projekt zu evaluieren. Dies soll in den Jahren 2001 und 2002 geschehen.

Folgende internationale Tagungen und Workshops fanden 1999 bei DESY-HASYLAB statt:

- EU Workshop: „Research with Synchrotron Radiation at HASYLAB“, 28. Januar 1999
- EU Workshop: „Scientific Applications and Experimental Developments for the VUV FEL at DESY“, 11.–12. März 1999
- EMBO Workshop: „Potential Future Applications in Structural Biology of an X-Ray Free Electron Laser at DESY“, 4.–8. Juli 1999
- „21<sup>st</sup> International Free Electron Laser Conference“ und „6<sup>th</sup> FEL Applications Workshop“, 23.–28. August 1999.

Ein IHP-RTD Antrag zur Entwicklung eines Pump-Probe Experiments mit subpicosekunden Zeitaufösung als Kombination aus einem Hochleistungslaser und dem VUV-FEL am DESY wird innerhalb des fünften Rahmenprogramms der Europäischen Kommission gefördert.

Aus dem Strategiefond der Hermann Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren konnten Gelder für den Bau einer „Seeding-Option“ für den FEL eingeworben werden.

Wie in den vergangenen Jahren hat die Bereitstellung von Reisegeldern im Rahmen der BMBF-Verbundforschung für Messaufenthalte bei HASYLAB für Wissenschaftler, denen keine anderen Mittel zur Finanzierung der Messreisen zur Verfügung standen, sehr zu einer effektiven Nutzung der verfügbaren Messzeit beigetragen. Das Förderprogramm der Europäischen Union zur Erleichterung des Zugangs zu Forschungseinrichtungen konnte für weitere drei Jahre verlängert werden und ermöglicht eine weitere Öffnung von HASYLAB für die internationale Nutzerschaft.

Der HASYLAB Jahresbericht 1999 wurde wieder als CD-ROM und im Internet veröffentlicht. Nur eine begrenzte Anzahl von gedruckten Exemplaren ist hergestellt worden. Er enthält 690 Beiträge von Experimenten am HASYLAB, inklusive der Strukturbiologie. Etwa 1600 Wissenschaftler von 262 Instituten waren an der Vorbereitung und Durchführung von Experimenten am HASYLAB 1999 beteiligt. Im Bereich der Strukturbiologie nutzten 500 Wissenschaftler von 100 Instituten,

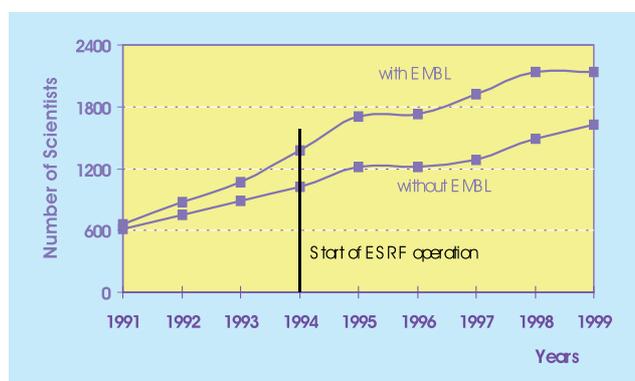


Abbildung 49: Anzahl der Wissenschaftler, die Experimente am HASYLAB durchgeführt haben, über die letzten neun Jahre (Nutzer, die pro Jahr mehr als ein Experiment nutzen, sind nur einmal gezählt).

im Wesentlichen aus Europa, die Einrichtungen und Messplätze von EMBL am DESY (Abb. 49).

## Linearer Dichroismus in den 2p-Photoelektronen-Spektren orientierter Cr Atome

In den letzten Jahren ist es einer Kollaboration von HASYLAB, der Universität Hamburg und der Arbeitsgruppe von P. Zimmermann von der Technischen Universität Berlin gelungen, die Untersuchungen des Dichroismus in den Photoelektronen-Spektren freier Atome auf fest gebundene innere Schalen auszuweiten. Derartige Untersuchungen des Dichroismus spielen bei der Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften von dünnen Filmen und von Vielschichtsystemen eine herausragende Rolle, da sie element- und ortsspezifische Aussagen ermöglichen. Chrom ist von besonderem Interesse, da es vom antiferromagnetischen Zustand des Festkörpers in den ferromagnetischen Zustand dünner Schichten übergeht. Der Vergleich der Spektren der freien Atome mit den entsprechenden Spektren dünner Filme erlaubt es, das Wechselspiel intraatomarer und interatomarer Wechselwirkungen sehr genau zu studieren. Abbildung 50 zeigt die experimentelle Anordnung. Die in einem Atomstrahllofen präparierten Atome werden durch Pumpen des  $\text{Cr } 3d^5 4s^7 S_3 \rightarrow 3d^5 4p^7 P_2$  Übergangs mit der zirkular polarisierten

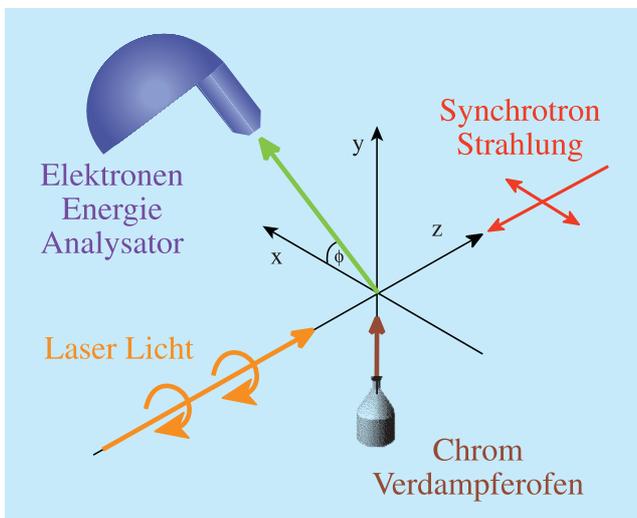


Abbildung 50: Experimentelle Anordnung zur Bestimmung des LMDAD in den Photoelektronen-Spektren laserorientierter Chrom Atome.

Strahlung eines Farbstofflasers orientiert. Linear polarisierte Undulatorstrahlung des HASYLAB-Messplatzes BW3 ionisiert die 2p-Elektronen, deren kinetische Energie mit einem Scienta SES-200 Elektronenenergie-Analysator bestimmt wird. Zur Bestimmung des Linearen Magnetischen Dichroismus (LMDAD) wurden die Photoelektronen-Spektren zueinander entgegengesetzt orientierter Atome gemessen und voneinander abgezogen. Das so erhaltene Spektrum ist durch die Punkte in Abbildung 51 wiedergegeben. Die um 12 eV getrennten, einige eV breiten Hauptstrukturen können in erster Näherung den  $2p_{1/2,3/2}^5 3d^5 4s^7 S$  Zuständen des  $Cr^+$  Ions zugeordnet werden. In diesen ionischen Endzuständen bleibt die im Grundzustand vorliegende parallele Orientierung der Spins der 3d und 4s Valenzelektronen im ionischen Endzustand erhalten. Übergänge in Zustände des  $Cr^+$  Ions, bei denen die Spins der Valenzübergänge umgekoppelt werden, prägen das Spektrum für Bindungsenergien oberhalb von 580 eV entscheidend mit.

Die Arbeitsgruppe von U. Hillebrecht der Universität Düsseldorf konnte in entsprechenden Untersuchungen am gleichen HASYLAB-Messplatz die 2p-Photoelektronen-Spektren einer dünnen Chrom-Oberflächenschicht auf einen Eisen-Einkristall bestimmen. In diesem Fall wurden die Chrom Atome durch das Anlegen eines Magnetfeldes orientiert. Die durch-

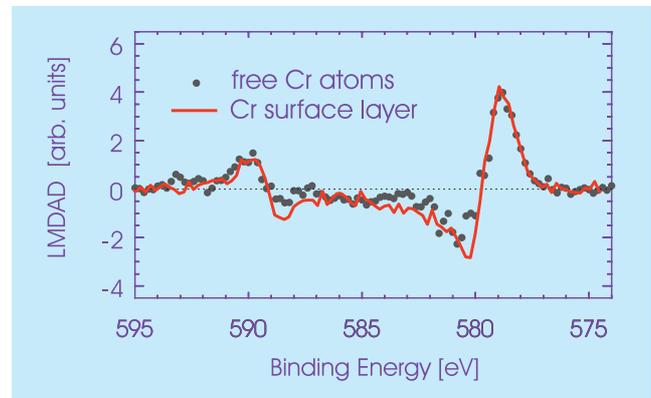


Abbildung 51: LMDAD (Linearer magnetischer Dichroismus), also die Differenz der Photoelektronen-Spektren für entgegengesetzt orientierte Atome für die Chrom  $2p^5 3d^5 4s$ -Zustände, gemessen an freien Atomen und an einer Chrom-Oberflächenschicht ( $h\nu = 705$  eV).

gezogene Kurve in Abbildung 51 zeigt den LMDAD der Chrom-Oberflächenschicht, das heißt die Differenz zweier Photoelektronen-Spektren für entgegengesetzte Magnetisierung des Eisenkristalls. Die sehr gute Übereinstimmung des atomaren LMDAD mit dem entsprechenden Spektrum einer monoatomaren Chrom-Schicht belegt den entscheidenden Einfluss der atomaren Wechselwirkung.

## Röntgen-Mikrotomographie

Synchrotronstrahlung (SR) zeichnet sich unter anderem durch hohe Leuchtdichte und Kollimation aus. Ihr Einsatz im Rahmen der Tomographie ermöglicht eine räumliche Auflösung im Bereich von einem Mikrometer (Mikrotomographie) und um hundert- bis tausendfach geringere Belichtungszeiten als mit Strahlung aus der klassischen Röntgenröhre.

Ausgestattet mit leistungsfähigen digitalen Flächendetektoren auf der Basis von CCD-Chips hat sich die Mikrotomographie interessante Anwendungsgebiete in den Materialwissenschaften, in der Kristallographie, Geologie, Biologie und der Medizin erschlossen. Neben dem Bildkontrast durch Röntgenabsorption kann durch Kombination mit einem Röntgen-Interferometer auch die phasenschiebende Wirkung der Substanzen als

Röntgenphasenkontrast genutzt werden. Dies ist nützlich zur Untersuchung speziell solcher medizinischer und biologischer Proben, die wegen ihrer Zusammensetzung aus überwiegend leichten Elementen im Absorptionssbild allenfalls schwachen, im Phasenbild aber noch sehr deutlichen Strukturkontrast zeigen.

Das Grundprinzip der auf Radon (1917) zurückgehenden und erstmals von Hounsfield 1973 verwirklichten Methode der Tomographie soll kurz erläutert werden: Wird ein ausgedehnter Körper mit einer inneren Struktur von einer ausgedehnten Röntgenquelle sehr guter Parallelität durchleuchtet, so erhält man eine Parallelprojektion und somit ein Bild der Dichteverteilung des Körpers quer zum Strahl. Dabei wird über die Dichteveränderung parallel zum Röntgenstrahl gemittelt, so dass diese Information verloren geht. Wird nun aber der Körper schrittweise gedreht und jeweils eine solche Dichteverteilung aufgenommen, erhält man aus der Gesamtheit der Dichteverteilungen im Prinzip die Strukturinformation des Objektes und zwar um so vollständiger, je feiner die Rasterung des Detektors und je größer die Zahl der unterschiedlichen Projektionswinkel ist.

Die Rückgewinnung der Struktur aus den Dichteverteilungen geschieht durch eine Rekonstruktion genannten Algorithmus, der auf modernen Rechnern in kurzer Zeit durchgeführt werden kann.

Ein dreidimensionales Objekt lässt sich untersuchen, indem der Körper schrittweise durch den Röntgenstrahl gefahren, jeweils eine dünne Schicht durchleuchtet wird und diese Schichten im Rechner übereinander gelegt werden. Das Ergebnis der tomographischen Untersuchung ist dann ein dreidimensionaler Datensatz, welcher für jedes Volumenelement („voxel“) der Probe die lokale Absorption pro voxel angibt, wobei die Kantenlänge des voxel durch die erzielte räumliche Auflösung bestimmt ist. Mit geeigneten Verfahren der Bildverarbeitung können durch die Daten Schnitte in beliebigen Richtungen gelegt werden. Die Probe kann dadurch zerstörungsfrei an jeder Stelle untersucht und gegebenenfalls auch später einer erneuten Analyse ohne abermaliges Messen unterworfen werden.

Die Apparatur zur Mikrotomographie am HASYLAB ist von der Arbeitsgruppe U. Bonse der Universität Dortmund in Zusammenarbeit mit HASYLAB aufgebaut worden, ein Prinzipbild ist in Abbildung 52 gezeigt. Der monochromatisierte Röntgenstrahl durchdringt die Probe, die sich auf einem Manipulator befindet, und wird auf einem Fluoreszenzschirm in sichtbares Licht umgewandelt. Dieses sichtbare Bild wird mit einer Linsensystem auf eine CCD-Kamera abgebildet, die die Information digitalisiert und in einem Rechner abspeichert. Durch Variation der Röntgenwellenlänge kann das Verfahren an die Probe angepasst werden. Für bio-

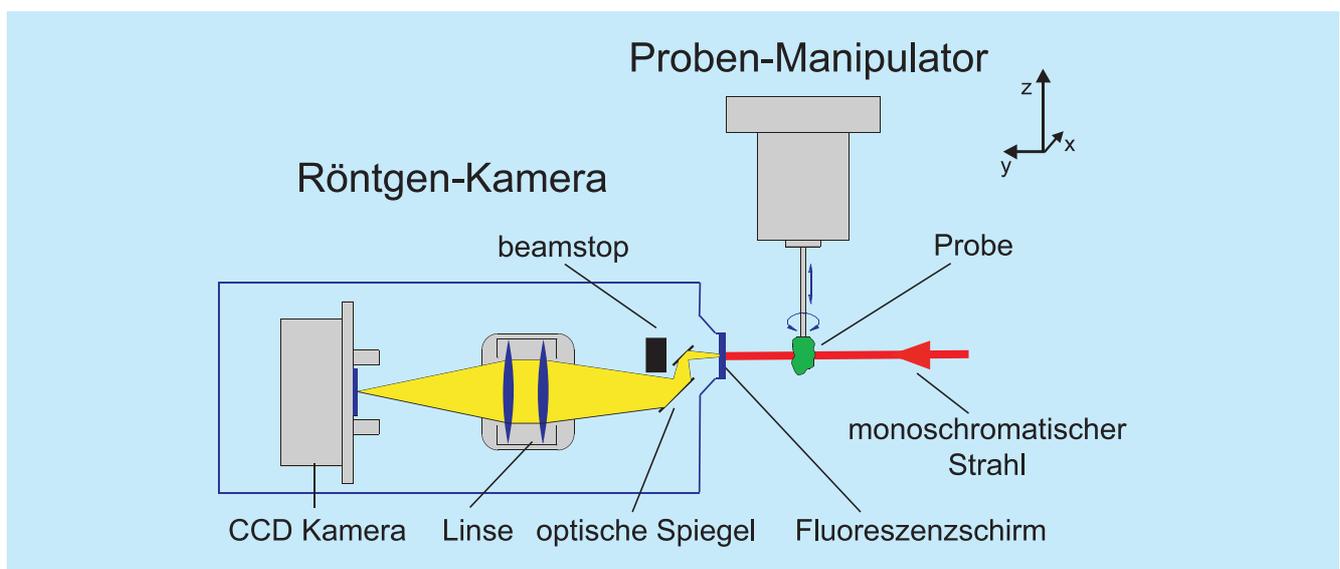


Abbildung 52: *Prinzipskizze des experimentellen Aufbaus zur Röntgen-Mikrotomographie.*

logische Proben wird weiche Strahlung mit größerer Wellenlänge gewählt, die auch in leichter Materie noch einen hinreichend hohen Kontrast erzeugt, für die Materialforschung nimmt man harte Strahlung mit kurzer Wellenlänge, da sie auch noch dicke Proben von schwerem Material durchdringt.

Abbildung 47 zeigt ein Beispiel aus dem medizinischen Bereich. Abgebildet ist ein Mikrokallus in der Beckenkambibiopsie eines an renaler Osteopathie erkrankten Patienten bei einer Wellenlänge von etwa 70 pm. Vermutlich entsteht die netzartige Struktur bei der neuerlichen Stabilisierung einer biomechanisch insuffizienten Knochenstruktur durch Brückenbildung zwischen unterbrochenen Trabekeln.

Das Potential dieser Methode in der Materialforschung zeigt Abbildung 53 am Beispiel einer röntgenmikrotomographischen Aufnahme eines Transistors. Links ist eine normale optische Photographie zu sehen und rechts die tomographische Aufnahme. Der Kontrast wurde hier so eingestellt, dass nur die schweren Metalle zu sehen sind, die leichteren Teile wie das Plastikgehäuse aber nicht. Man kann jetzt sehr schön sehen, wie die Anschlüsse innerhalb des Plastikgehäuses geführt sind. Allerdings ist das Herzstück des Transistors, der Siliziumchip, nicht zu sehen, da Silizium ebenfalls ein leichtes Element ist. Die Anschlussdrähte enden im Leeren.

Abbildung 54 entstand in einer Zusammenarbeit mit T. Lippmann und J. Heerens von der Abteilung für

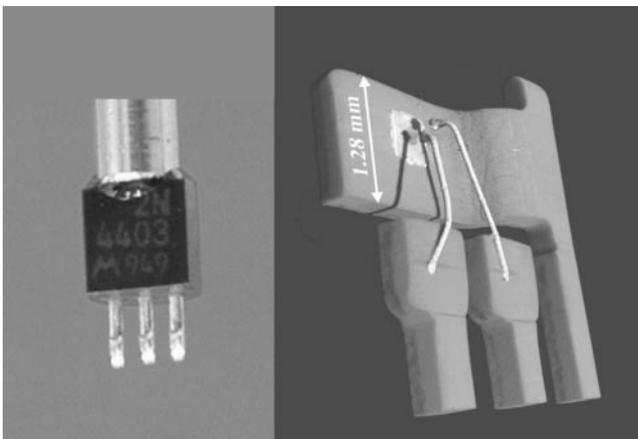


Abbildung 53: Photographie und röntgen-mikrotomographische Aufnahme eines Transistors.

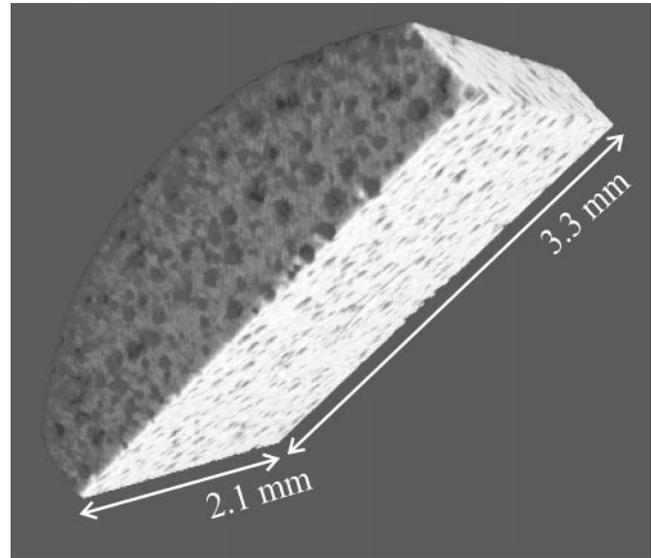


Abbildung 54: Verteilung von Kohlenstoff-Einschlüssen in einem Gusseisen-Stück, dargestellt durch eine mikrotomographische Aufnahme mit harter Röntgenstrahlung.

Werkstoffmechanik der GKSS. Hier konnte die Verteilung von Kohlenstoff-Einschlüssen in Gusseisen-Proben mit Hilfe der Röntgen-Mikrotomographie untersucht werden. Gezeigt ist ein Stück Gusseisen, in dem man die Größe und Verteilung von Kohlenstoff-Einschlüssen als dunkle Flecken sehen kann. Durch zyklisches Verformen mit nachfolgender mikrotomographischer Untersuchung kann das Zusammenfließen der Einschlüsse zu immer größeren Strukturen verfolgt werden, das zu einer Schwächung des Materials führt.

## Dreidimensionale elektronische Impulsdichte von Festkörpern

Die Untersuchung der Bandstruktur von kristallinen Festkörpern wird seit vielen Jahren mit Hilfe von Photoelektronen-Spektroskopie, unelastischer Röntgenstreuung, Elektronenenergieverlust-Spektroskopie und einer Vielzahl weiterer Methoden betrieben. Dabei werden in der Regel nur die Energie-Eigenwerte der Bandstruktur bestimmt. Die direkt von den dazu gehörenden Wellenfunktionen abgeleiteten Größen, wie zum Beispiel die Elektronendichten im Orts- oder Impulsraum, werden dagegen seltener untersucht.

Eine Methode zur Bestimmung der Elektronen-Impulsdichte ist die Compton-Streuung: auf Grund der Geschwindigkeitsverteilung der Valenz-Elektronen erfährt bei tiefunelastischer Röntgenstreuung die Streustrahlung eine Art Dopplerverbreiterung, die dem sogenannten Compton-Profil proportional ist. Dieses Profil entspricht der Impulsdichte, integriert über zwei der drei kartesischen Komponenten des Elektronen-Impulses. Die Integration resultiert aus der Unkenntnis der Impulsverteilung der Rückstoß-Elektronen.

Aus einer koinzidenten Messung des Impulses des gestreuten Röntgenquants und des dazugehörigen Rückstoß-Elektrons kann man unter Kenntnis des primären Photonen-Impulses eindeutig den Impuls des Valenz-Elektrons vor der Streuung rekonstruieren. In diesem Fall findet die im klassischen Compton-Experiment unvermeidbare Integration nicht statt, die Energieverteilung der Streustrahlung ist der Impulsverteilung der Elektronen direkt proportional und der Informationsgehalt der Messung ist signifikant höher. Diese koinzidente Compton-Spektroskopie, kurz  $(\gamma, e\gamma)$ -Reaktion genannt, ist seit vielen Jahren bekannt. Es wurde aber auch früh registriert, dass insbesondere elastische Vielfachstreuung der Rückstoß-Elektronen in der Probe die Information über ihren Impuls verfälschen kann. Es sind daher Proben erforderlich, die erheblich dünner als die mittlere freie Weglänge für elastische Streuung der Rückstoß-Elektronen sind. Diese ist für Rückstoßenergien von etwa 70 keV in Probenmaterial niedriger Kernladungszahl von der Größenordnung 100 nm. Solch hohe Rückstoßenergien erreicht man bei Verwendung von Photonen im Energiebereich um 180 keV, die allerdings nur sehr schwach inelastisch gestreut werden, das heißt nur etwa ein Photon aus einer Million.

Zur Rekonstruktion des Elektronen-Impulses müssen die Impulsrichtungen auf einige Milliradian genau festgelegt werden und es kommen Detektoren mit kleinem Akzeptanzwinkel zum Einsatz. Auch bei Verwendung zweidimensionaler, ortsempfindlicher Detektoren führt diese Bedingung zu einer starken Verminderung der koinzidenten Zählraten. Bei einem monochromatisierten Photonenfluss von etwa  $10^{12}$  Photonen/s an der Probe kann man nur mit Koinzidenzraten von wenigen Hz rechnen. Dies zeigt, dass  $(\gamma, e\gamma)$ -Experimente nur mit sehr intensiver Synchrotronstrahlung hoher Ener-

gie durchgeführt werden können, wie sie zum Beispiel der PETRA Speicherring liefert.

Abbildung 55 zeigt den experimentellen Aufbau am PETRA-Undulatorstrahl. Ortsempfindliche Detektoren werden sowohl im Elektronen- wie im Photonenweig eingesetzt. Die hier beschriebenen Messungen wurden in einer Zusammenarbeit mit F. Bell von der Universität München durchgeführt. Als Probe dienten 20 nm dünne, freitragende Graphitfilme, die entweder durch Verdampfen (V-Probe) oder durch Laser-Ablation (A-Probe) hergestellt wurden. Elektronenmikroskopische Beugungsaufnahmen zeigten eine isotrope Verteilung der Graphitkristalle für die A-Probe, während sich die V-Probe durch eine starke Textur auszeichnete: in der Filmebene ist die Orientierung der Basalebenen des Graphits statistisch verteilt, ihre c-Achse steht jedoch weitgehend senkrecht zur Filmebene. Da die Impulsdichte von Graphit stark anisotrop ist, erwartet man Unterschiede in den Impulsdichten beider Proben für Impulsrichtungen senkrecht ( $P_{\perp}$ ) bzw. parallel ( $P_{\parallel}$ ) zur Filmebene.

Im Folgenden werden die experimentellen Ergebnisse mit denen unterschiedlicher Bandstrukturrechnungen für Graphit verglichen. Dabei handelt es sich um eine „Linear Muffin-Tin Orbital“-Rechnung (LMTO), eine Pseudopotential-Rechnung (PP) und eine „Augmented Plane-Wave“-Rechnung (APW). Alle drei Rechnungen basieren auf der Dichte-Funktional-Theorie. Abbildung 56 zeigt die absoluten Impulsdichten als Funktionen von  $P_{\parallel}$  ( $P_{\perp} = 0$ ) bzw.  $P_{\perp}$  ( $P_{\parallel} = 0$ ) für die V-Probe ((a) und (c)) und die A-Probe ((b) und (d)), jeweils verglichen mit den entsprechenden theoretischen Kurven. Während die APW- und LMTO-Rechnungen die Daten gut beschreiben, weicht die PP-Rechnung

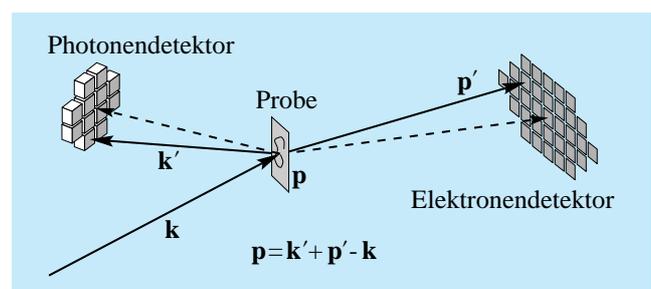


Abbildung 55: Schema des experimentellen Aufbaus.

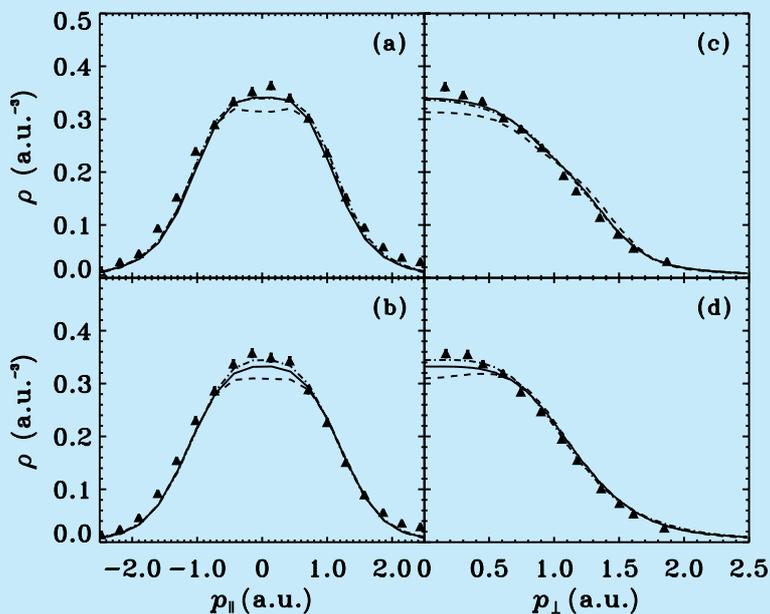


Abbildung 56: Vergleich experimenteller Impulsdichten für zwei verschiedene Graphitfolien mit Ergebnissen aus Bandstruktur-Rechnungen. V-Probe – (a) und (c), A-Probe – (b) und (d). LMTO (durchgezogen), PP (gestrichelt), APW (punkt-gestrichelt).

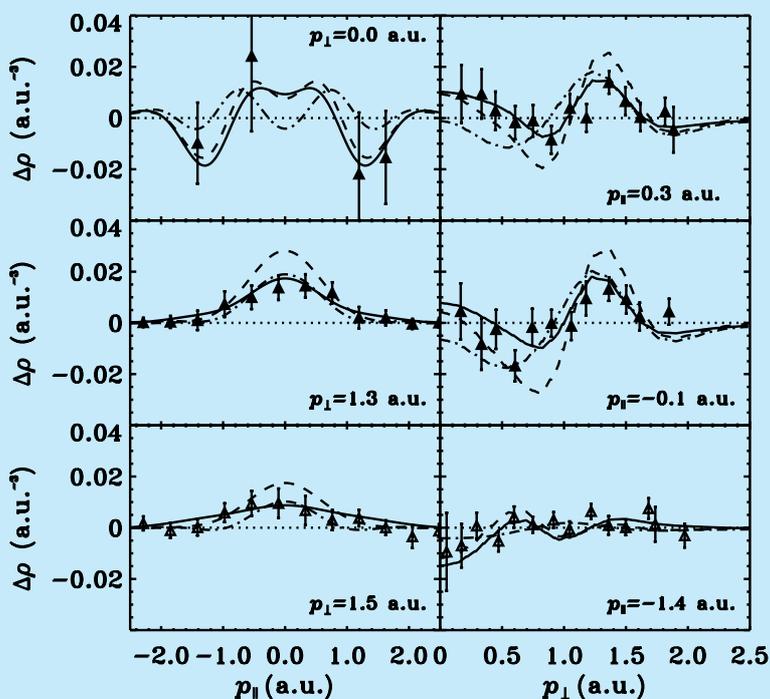


Abbildung 57: Differenzen der Impulsdichten der beiden Graphit-Folien und Vergleich mit Rechnungen.

signifikant vom Experiment ab. Dies zeigt sich noch deutlicher in den Differenzen der Impulsdichte für beide Proben.

Abbildung 57 zeigt die Differenz der Impulsdichten von V- und A-Probe für verschiedene Kombinationen von  $P_{\perp}$  und  $P_{\parallel}$ . Auch hier gibt die PP-Rechnung das Experiment nur schlecht wieder, die LMTO-Rechnung ist

im Vorteil gegenüber APW. Der quantitative Vergleich zwischen Experiment und Theorie zeigt, dass die an einem Speicherring wie PETRA möglichen Ereignisraten in Kombination mit der gegenüber konventioneller Compton-Streuung wesentlich verbesserten, dreidimensionalen Impulsauflösung ausreichen, um zwischen verschiedenen, modernen Bandstrukturechnungen entscheiden zu können.

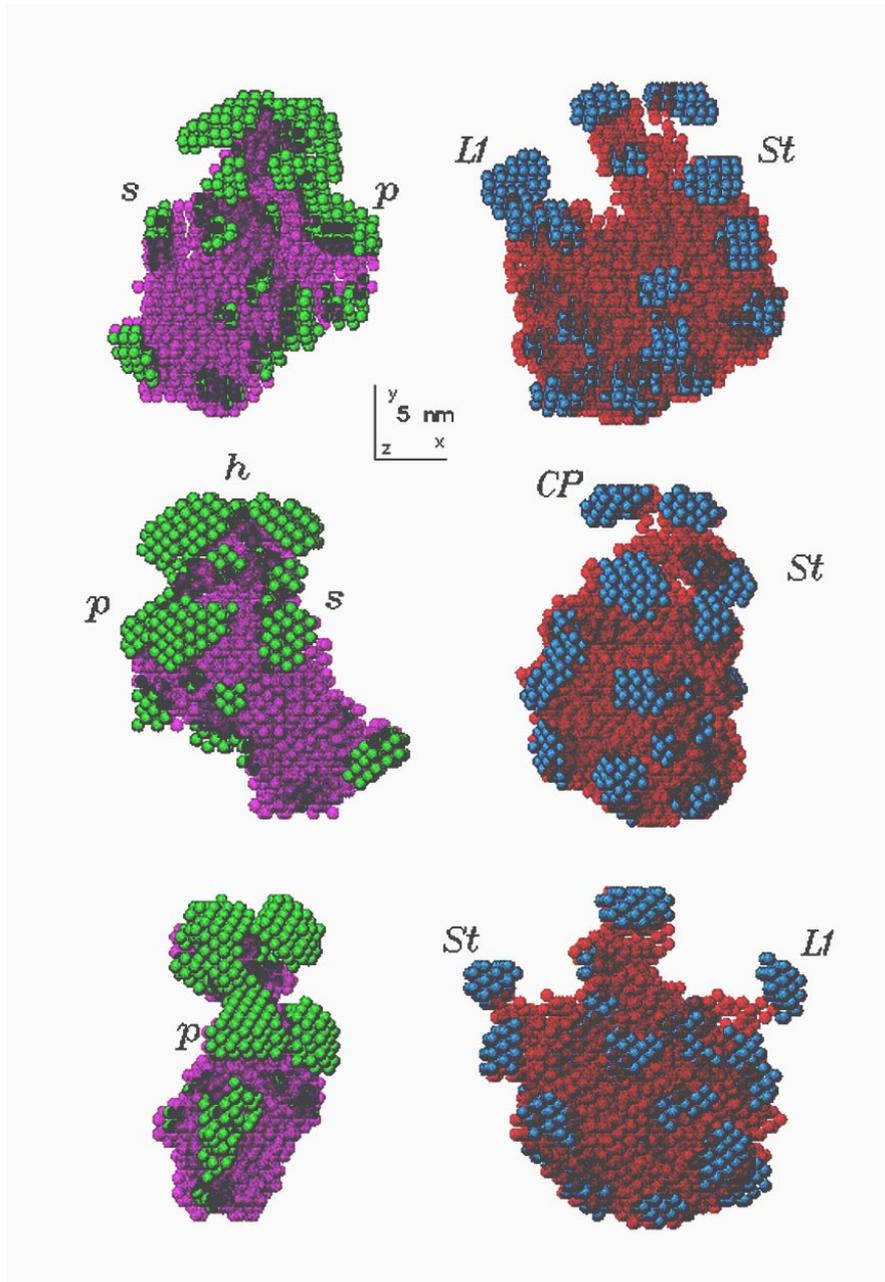


Abbildung 58: Modell der Protein- und RNS-Verteilung in den 30S (links) und 50S (rechts) Untereinheiten des 70S Ribosoms, basierend auf der simultanen Interpretation von 42 unabhängigen Röntgen- und Neutronen-Kontrastvariationskurven. Die blauen und grünen Kugeln stellen die Proteinanteile dar, die magenta und roten Kugeln die RNS-Anteile. Die Modelle in der unteren und mittleren Reihe sind um  $120^\circ$  und  $240^\circ$  um die Y-Achse gedreht worden.

# Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie EMBL –Außenstelle Hamburg–

**Leitung:** M. Wilmanns

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

Im Laufe des Jahres 1999 wurden von der EMBL-Außenstation wieder insgesamt sechs Messstationen für die Bereiche Kristallographie an biologischen Makromolekülen, Kleinwinkelstreuung und Röntgenabsorptions-Spektroskopie an nicht-kristallinen biologischen Systemen zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden von der Außenstelle Hamburg 311 Projekte von Forschungsgruppen aus 21 Ländern betreut. Eine große Zahl dieser Projekte konnte mit Mitteln aus dem TMR/LSF-Programm der EU unterstützt werden. Diese Unterstützung kann auch zukünftig mit Mitteln aus dem VI. Rahmenprogramm der EU fortgeführt werden.

Im Sommer 1999 wurde mit dem Umbau der Messstation X13 zu einer kristallographisch orientierten Messstation (unter anderem mit Unterstützung des IMB Jena und BMBF-Verbundmitteln an die Universität Hamburg) begonnen, nachdem die Aktivitäten im Bereich Kleinwinkelstreuung an Lipiden und Muskeln bei EMBL beendet worden waren.

Ein hervorragendes wissenschaftliches Programm ist für die EMBL-Außenstation mit ihren intensiven Aufgaben in der Nutzerbetreuung von essentieller Bedeutung.

Im Laufe des Berichtsjahres wurde bei EMBL ein neues Labor für eukaryontische Expression für Baculovirus infizierte Insektenzellen erfolgreich etabliert. Außerdem wurde eine neue, kleine Bibliothek mit Zugang zu elektronisch erhältlichen Zeitschriften eingerichtet.

Im Laufe des Jahres 1999 wurden von EMBL Hamburg drei Workshops angeboten mit dem Ziel, fortgeschrittenes Training für die Benutzung der Messstationen an der EMBL-Außenstation und die damit verbundenen technischen und wissenschaftlichen Fragestellungen anzubieten. Im Sommer 1999

wurde mit Unterstützung von EMBO ein Internationaler Workshop für die potentiellen Nutzungen des von DESY an TESLA geplanten Röntgenlasers im Bereich der Biologie organisiert.

Die meisten Vorträge dieses Workshops sind in einem Buch zusammengefasst, das vom EMBL-Sekretariat bezogen werden kann.

## Forschungsschwerpunkte

Im Jahre 1999 wurde eine Vielzahl an Projekten durchgeführt, ein Großteil davon in Kooperation mit anderen Labors aus ganz Europa.

Im Folgenden sind die wissenschaftlichen Aktivitäten der Forschungsgruppen aus den Bereichen Instrumentierung, Proteinkristallographie, Kleinwinkelstreuung und Röntgenabsorptionsspektroskopie kurz zusammengefasst.

Für alle weiteren Projekte und Einzelheiten wird auf den HASYLAB-Jahresbericht und auf den EMBL-Forschungsbericht verwiesen.

## Instrumentierung

Im Jahr 1999 wurde eine Reihe von signifikanten Verbesserungen und Änderungen an den von der EMBL-Außenstelle betriebenen Messstationen durchgeführt. In besonderem Maße traf dies auf die von der Proteinkristallographie genutzten Strahlführungen zu. Wie in den vorhergehenden Jahren lag hierbei das Augenmerk auf einer Verbesserung der Gesamteffizienz der Messplätze durch Erhöhung der Photonenzahl auf der Probe, schnellere Detektorsysteme und eine erhöhte Benutzerfreundlichkeit. Die bedeutsamste Änderung fand

am Wiggler-Messplatz BW7A statt, an dem ein sagittal fokussierender Monochromator aufgebaut wurde, von dem einige wesentliche Konstruktionsmerkmale im Folgenden beschrieben werden.

Der neuartige Monochromator ist in Abbildung 59 dargestellt. Das System basiert auf einem ebenen, wassergekühlten ersten Kristall und einem besonders geformtem zweiten Kristall, welcher der Fokussierung dient. Die Kristalle sind in einer pseudo „channel-cut“ Konfiguration angeordnet, die eine konstante Höhe des monochromatisierten Strahls gewährleistet („fixed exit“) und außerdem sehr schnelle Änderungen der Strahlenergie ermöglicht. Entscheidend ist die direkte Wasserkühlung des ersten Kristalls mittels 0.5 mm breiter Kühlkanäle, die bis 0.6 mm an die reflektierende Oberfläche heranreichen. Auf diese Weise sind die extremen thermischen Belastungen im Wigglerstrahl ohne erkennbare Verschlechterung der Reflexionseigenschaften zu bewälti-

gen. Wie in Abbildung 59 zu sehen ist, besitzt der zweite Kristall die Form von zwei an der Basis verbundenen gleichschenkligen Dreiecken, deren Rückseite durch eine Reihe von Stegen verstärkt wird. Diese besondere Form und die Anordnung der Stege auf der nicht reflektierenden Seite des Kristalls bewirken, dass sich dieser bei der Fokussierung rein zylindrisch verformt, ohne unerwünschte Biegungen in andere Richtungen zuzulassen („anticlastic bending“), die das Reflexionsvermögen stark beeinträchtigen würden. Nach eingehenden Tests zu Beginn des Jahres wurde der Monochromator nach der Sommerpause an die Nutzerschaft übergeben. Durch den jetzt weitaus höheren Photonenfluss sowie die Installation eines MAR CCD Detektors entspricht die Strahlführung BW7A nun anspruchsvollen internationalen Standards.

Auch am Messplatz X11 wurde die MAR 345 „Image plate“ durch einen MAR CCD Detektor ersetzt und die

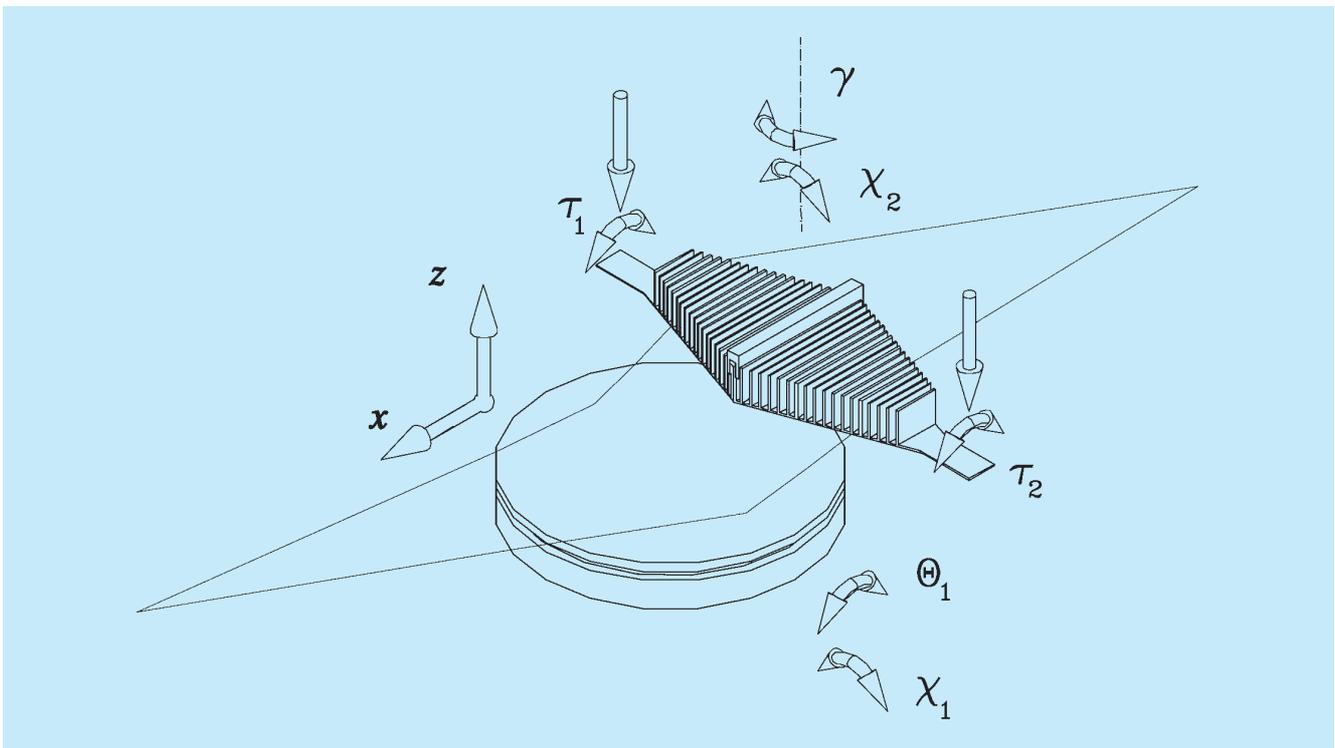


Abbildung 59: Schematische Darstellung des fokussierenden Doppel-Monochromators am EMBL Messplatz BW7A. Der „weiße“ Röntgenstrahl fällt von links auf den ersten wassergekühlten Kristall. Anschließend wird er vom zweiten diamantförmigen Kristall horizontal fokussiert. Die verfügbaren Freiheitsgrade, die für eine optimale Justierung benötigt werden, sind durch Pfeile angedeutet.

so frei gewordene „Image plate“ an den MAD Messplatz X31 transferiert. An beiden Stellen konnte der Datendurchsatz dadurch erheblich gesteigert werden. Der Umbau von X13, dem ehemaligen Messplatz für Kleinwinkelstreuung, in einen Messplatz für Proteinkristallographie wurde begonnen. Die Kleinwinkelapparatur wurde durch eine bei EMBL entwickelte Röntgenkamera ersetzt, und der Si(220) Monochromator für die horizontale Fokussierung ist bereits in sein Vakuumgefäß eingebaut und wird Anfang 2000 getestet werden. Außerdem wurden der Rhodium-beschichtete Röntgenspiegel (vertikale Fokussierung) sowie ein modernes Schrittmotorsystem bestellt. Beide Komponenten sollten bis Mitte nächsten Jahres geliefert sein, so dass die weitere Umgestaltung der Strahlführung in einer längeren Betriebspause durchgeführt werden kann.

### Proteintitration im kristallinen Zustand

Proteine haben komplexe Strukturen, deren Stabilität abhängig ist von einem Gleichgewicht vielfacher Interaktionen vergleichbarer Stärke, die wiederum in Relation zur äußeren Umgebung stehen. Die Anwesenheit von Lösungsmitteln in Proteinkristallen erlaubt, die physiko-chemischen Eigenschaften eines Proteins zu verändern. Dies ermöglicht es, Prozesse zu studieren, bei denen Protonen-Transfer eine zentrale Rolle spielt, oder bei denen Ligandbindungsaffinitäten durch den pH-Wert oder die Ionenstärke der Lösung reguliert werden.

Röntgendiffraktion kann benutzt werden, um subtile Änderungen zu identifizieren, die durch geringe Verschiebungen von physiko-chemischen Parametern verursacht werden. Im Fall eines pH-kontrollierten Prozesses kann die Lokalisierung von Wasserstoff-Atomen eine direkte Bestimmung der Protonierung von Resten erlauben, die essentiell für die Stabilität oder Funktion eines Makromoleküls sind.

Mit dieser Idee wurden pH-Effekte in einer Proteinstruktur mit Hilfe der Röntgenstrukturanalyse entdeckt, die zu Rückschlüssen auf die Rolle eines Protonengleichgewichts in biologischen Prozessen führen können.

Der Effekt des pH-Werts wurde anhand der kristallinen Struktur der RNase A als Modellsystem unter-

sucht. Dieses Enzym katalysiert eine pH-abhängige Reaktion mit einem Mechanismus, der einen „2-Protonen-Shift“ involviert. Obwohl RNase A bereits in vielerlei Hinsicht untersucht wurde, wurde der von diesem Enzym katalysierte 2-Schritt Reaktionsmechanismus kürzlich neu interpretiert. RNase A-Kristalle wurden in einer stufenweisen Prozedur in gepufferte Lösungen überführt, wobei der pH-Wert in Schritten von 0.2 pH-Einheiten angeglichen wurde. Die Diffraktionsexperimente wurden an der Messstation X11 am DORIS-Speicherring durchgeführt. Datensätze bei atomarer Auflösung (1.1 Å) wurden von Kristallen bei sechs verschiedenen pH-Werten im Bereich von 5.2 bis 8.8 durchgeführt und die korrespondierenden Strukturen verfeinert. Die geänderten pH-Werte induzierten die größten strukturellen Änderungen im Bereich des aktiven Zentrums. Vorhergehende kristallographische Untersuchungen zeigten bereits, dass das Histidin-12 in der Proteinmatrix verankert ist. Die neuen Daten zeigen ebenfalls, dass die Konformation der His-12 Seitenkette nicht durch Änderungen der pH-Werte beeinflusst wird. Die Mobilität dieser Seitenkette ist in allen sechs Modellen relativ gering, wie den atomaren Temperaturfaktoren entnommen werden kann. Ein Vergleich der sechs Elektronendichtekarten bei den verschiedenen pH-Werten erlaubt die direkte Beobachtung des Deprotonierungsprozesses von His-12.

Abbildung 60 zeigt die Präsenz eines Wasserstoffes am proximalen Stickstoff N<sub>δ1</sub>. Im Gegensatz dazu ist der Wasserstoff an N<sub>ε2</sub> bei azidischem pH präsent, nicht aber bei höheren pH-Werten. Diese Daten unterstützen den vorgeschlagenen Mechanismus, der einen Austausch eines Protons zwischen dem N<sub>ε2</sub> von His-12 und dem Substrat annimmt. Nach unserer Kenntnis ist das die erste Demonstration für eine Restedeprotonierung in einer kristallinen Umgebung. Generell wird angenommen, dass Röntgendiffraktion auf die Entschlüsselung von statischen Prozessen beschränkt ist. Die vorgestellte Sequenz von Strukturen bei verschiedenen pH-Werten erlaubt Aufschlüsse über einen dynamischen Prozess. Die strukturellen Änderungen sind klein, aber signifikant, bezogen auf die Genauigkeit der verfeinerten Strukturen (Koordinatenfehler ist etwa 0.02 Å). Diese Studie verdeutlicht die Vorteile von kristallographischen Analysen bei atomarer Auflösung, um strukturelle Änderungen zu entdecken, die Entschlüsselungen von biologischen Funktionen erlauben.

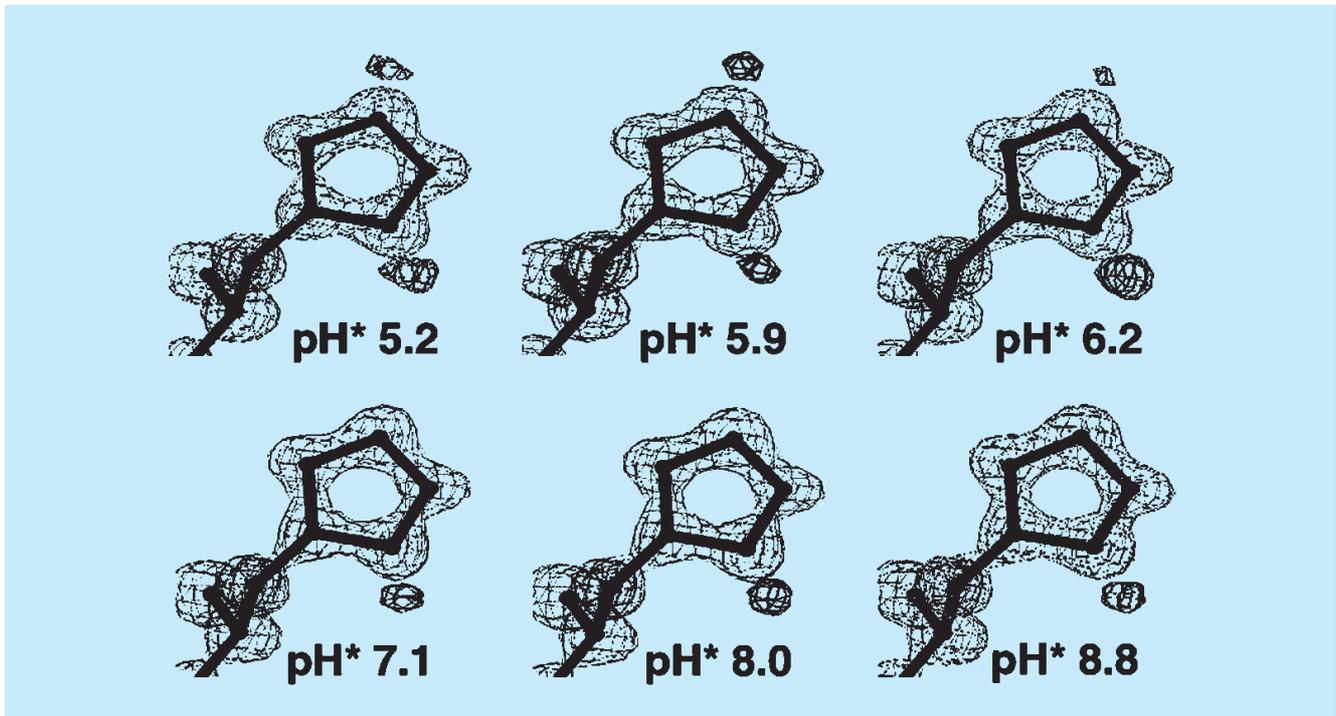


Abbildung 60: Reihe von Aufnahmen, die die Deprotonierung des Imidazolrings des  $N_{\epsilon 2}$  Atoms von His-12 zeigen: die Differenzelektronendichtekarte ist bei  $1.6 \sigma$  konturiert.

## Virale Replikationsproteine

Ziel der Untersuchungen ist es, den Prozess der DNS-Replikation am Beispiel von zwei Klassen von doppelsträngigen DNS-Viren auf molekularer Ebene zu verstehen. Von Interesse sind repräsentative Modelle für den komplizierten DNS-Replikationsprozess der Eukaryonten sowie strukturelle Information über Targets/Oberflächen für das Design von antiviralen Wirkstoffen.

In der erste Klasse der Adenoviren findet die DNS-Replikation durch den sogenannten „Strand Displacement“-Mechanismus statt, in dem ein Protein und nicht RNS als „Primer“ eingesetzt wird. Diese Virusfamilie kodiert für drei Proteine, die wichtig für die Replikation der viralen DNS sind: die Polymerase (pol), das präterminale Protein (pTP), das einzelsträngige DNS-bindende Protein (DBP), sowie eine Protease, die für die Umwandlung von pTP in TP notwendig ist. Der Ad-5 pol-pTP Komplex wurde amplifiziert und gereinigt, und erste Kristallisationsansätze wurden durchgeführt. Geplant ist, auch das pTP der

Ad-4 zu kristallisieren. Die Expression von pol allein in Insektenzellen war sehr gering, da es toxisch für die Zellen und instabil gegen eine oder mehrere zelluläre Proteasen ist. Deshalb wurden Insektenzellen mit zwei rekombinierten Bakuloviren infiziert, die pTP bzw. pol produzieren. Hierdurch wurde eine größere Proteinproduktion des 1:1 pTP-pol Komplexes erlangt, und es konnte gezeigt werden, dass pol durch die Komplexbildung stabilisiert wird. Das pol Protein befindet sich nun in Kristallisationsansätzen. Ebenfalls wird daran gearbeitet, pol und pTP unter der Kontrolle von pol- und p10-Promotoren im selben rekombinanten Bakulovirus gemeinsam zu exprimieren (Koexpression).

Der Herpes Simplex Virus-1 (HSV-1) kodiert sieben Proteine, die für die Replikation der viralen DNS während der lytischen Phase notwendig sind. Das Interesse gilt der Struktur des einzelsträngigen DNS-bindenden Proteins (SSB) des Herpes Simplex Virus-1 (ICP8), welches für ein SSB Protein ungewöhnlich groß ist (128 kDa). Schon früher wurde das vollständige Protein in Insektenzellen exprimiert und ein Protokoll für die Protein-Reinigung etabliert. Das Protein wurde als

dünne Plättchen innerhalb eines engen pH-Bereichs und in Anwesenheit von Magnesium oder Kalzium kristallisiert. Die derzeitigen Kristalle diffraktieren jedoch nur bis zu einer Auflösung von 7 Å. Proteolytische Experimente mit und ohne DNS und massenspektrometrische Analysen zeigen, dass die 300 N-terminalen Reste nicht in die DNS-Protein-Interaktionen involviert sind. Sequenzanalysen und biochemische Studien deuten darauf hin, dass der C-Terminus das Lokalisationssignal für den Zellkern (NLS) beinhaltet und nicht strukturiert ist. Es konnte gezeigt werden, dass diese C-terminale Region der Hauptgrund der kooperativen Bindung ist. Kristalle der C-terminalen Mutante sind größer, und es konnten Diffraktionsdaten bis 2.8 Å Auflösung gesammelt werden. Das schwache Streuvermögen der Kristalle erfordert die Nutzung von Synchrotronstrahlen, um die Phase entweder durch klassische Schweratomderivate oder durch Seleno-Methionine enthaltende Proteine zu bestimmen.

### Evolution von Proteinen in der Histidinbiosynthese

Nicht erst seit Forschungen durch Darwin im 19. Jahrhundert ist das Verstehen von Evolution über einen Zeitraum von mehreren Millionen Jahren eines der packendsten Gebiete in der Biologie. Nachdem experimentelle Aussagen über die Evolution von lebenden Organismen bis in die jüngste Vergangenheit vor allem mit paläontologischen Methoden erzielt wurden, wurde diese Forschung in den letzten Jahren durch die Kenntnis einer Vielzahl von DNS- bzw. Proteinsequenzen revolutioniert, so dass genaue phylogenetische Stammbäume der drei Königreiche der Lebewesen, der Archaeabakterien, der Eubakterien und der Eukaryonten, aufgestellt werden konnten. Diese Methoden werden zur Zeit durch die vollständige Sequenzierung der Genome verschiedener Organismen mit einer riesigen Quantität von Sequenzdaten untermauert, die vorhandene Vorstellungen von biologischen Datenmengen völlig sprengt. Die meisten kodierten Gene dieser Sequenzen sind in definierte, molekulare Raumstrukturen gefaltet. Diese Strukturen können mit Hilfe der Röntgenstrukturanalyse und Synchrotronstrahlung bestimmt werden. Seit einigen Jahren stellt sich heraus, dass die Kenntnis dieser Strukturen für die Evolutionsforschung von größter Bedeutung ist, da das Ausmaß der Konservierung von erkennbaren gemeinsamen

strukturellen Eigenschaften größer ist als die Konservierung von nachweisbaren Sequenzähnlichkeiten.

Wegen ihrer Überschaubarkeit sind metabolische Biosynthesewege für evolutionäre Studien besonders geeignet. Das Interesse gilt den Biosynthesewegen von zwei aromatischen Aminosäuren, Histidin und Tryptophan. Beide Aminosäuren gehören zu den insgesamt zwanzig Aminosäuren, aus denen die Polypeptidketten von Proteinen aufgebaut sind, und müssen vom Menschen, nicht aber von Bakterien, mit der Nahrung aufgenommen werden. Schon vor Jahren fiel eine Häufung von sogenannten TIM-Barrelstrukturen in der Tryptophan-Biosynthese auf. Mit Hilfe dieser Strukturen wurden TIM-Barrelstrukturen für zumindest zwei Genprodukte aus der Histidinbiosynthese vorhergesagt. Die Strukturen dieser beiden Genprodukte, HisA und HisF, aus dem hyperthermophilen Organismus *Thermotoga maritima* wurden nun aufgeklärt (Abb. 61). Tatsächlich sind beide Proteine als TIM-Barrels gefaltet, was frühere Vorhersagen bestätigt.

Darüber hinaus zeigen beide Strukturen, HisA und HisF, eine zweifache Wiederholung von Faltungsmustern in den beiden Strukturen. Diese Wiederholungen werden an charakteristischen Mustern der Schlaufen auf beiden Seiten der Barrel, identischen Resten in mehreren Positionen und praktisch identischen Phosphatbindungsstellen, deutlich. Tatsächlich können charakteristische Merkmale in allen vier Hälften (zwei von HisA, zwei von HisF) wieder gefunden werden, wenn sie übereinander gelegt werden. Somit liefern diese beiden Strukturen starke Indizien, dass beide Proteine, HisA und HisF, durch eine Genduplikation eines Halb-Barrels zu einem vollständigen primitiven Barrel, das dann weiter diversifiziert wurde, entstanden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strukturbiologie nicht nur eine Methode mit großer Zukunft ist, sondern auch Erkenntnisse in die lange Geschichte der Evolution vermittelt.

### Nichtkristalline Systeme

Röntgenstreuung an nichtkristallinen Proben wird in vielen Gebieten der Grundlagen- und angewandten Forschung in den Biowissenschaften eingesetzt. Messungen an Lösungen von Biomakromolekülen ermöglichen

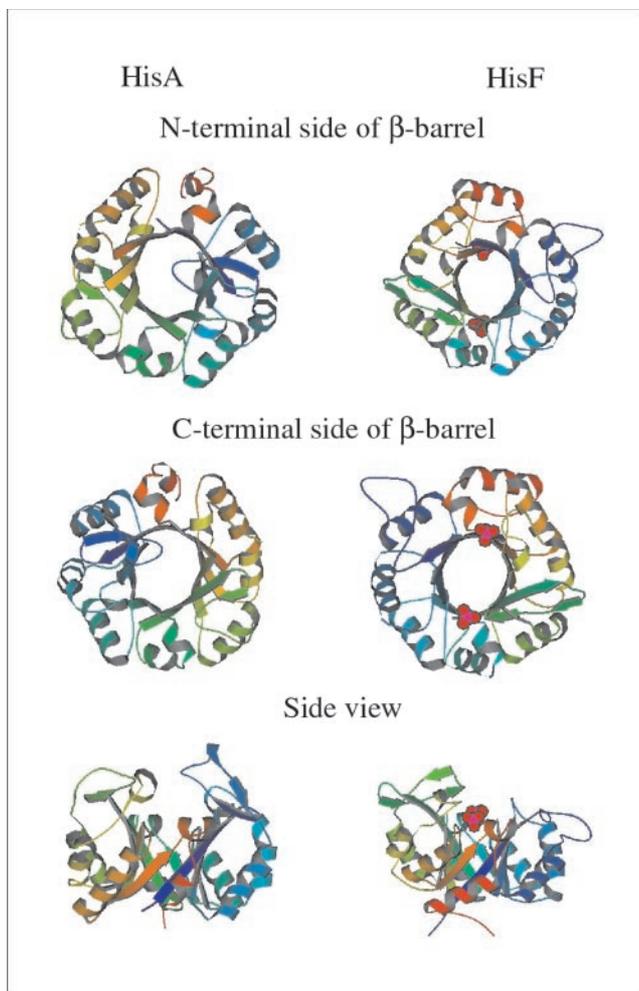


Abbildung 61: *Ribbon-Darstellungen der beiden Barrel-Strukturen von HisA und HisF aus drei unterschiedlichen Perspektiven.*

es, die Form der Moleküle oder ihrer Komplexe im nativen Zustand in Lösung zu bestimmen und eventuelle Unterschiede zu Kristallstrukturen oder elektronenmikroskopischen Modellen festzustellen. Das Interesse an diesen Anwendungen wächst, und im November fand eine von der EU finanzierte Tagung über Formbestimmung von Biomakromolekülen in Lösung statt, an der 50 Wissenschaftler aus der ganzen Welt teilnahmen.

In den eher angewandten Bereichen bieten Studien am thermischen Verhalten von potenziellen Arzneistoffträgern, von bioabbaubaren Polymeren und biokompatiblen Materialien eine Fülle an interessanten Projekten.

Die Entwicklung von ASICs („Application Specific Integrated Circuit“) für die Parallelauslese von Detektoren mit Verzögerungsleitungen und ihre Anwendung wurde im Rahmen des von der EU finanzierten PAsERO Projekts in Zusammenarbeit mit EMBL (Grenoble), Smart Silicon Systems (Lausanne), dem Institut für Biophysik und Röntgenstrukturforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Graz) und der Firma HECUS M. Braun Graz X-Ray Systems (Graz) weitergeführt.

Von den Ergebnissen der Anwendung von Synchrotronstrahlung an biologischen Systemen oder synthetischen Polymeren, die in Zusammenarbeit mit auswärtigen Gruppen erzielt wurden, werden hier nur zwei Beispiele kurz erwähnt.

Das erste ist ein neues Modell der Protein-rRNS-Verteilung im 70S Ribosom von *Escherichia coli*, das in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Molekulare Genetik (Berlin) entwickelt wurde. 42 Röntgen- und NeutronenstreuKurven von *E. coli* Ribosomen mit allen möglichen Kombinationen von deuterierten und protonierten Protein- und RNS-Anteilen in den Untereinheiten wurden simultan, mittels einer neuen Methode, analysiert. Das kryoelektronenmikroskopische Modell von Frank et al. wurde in 7890 Kugeln mit 0.5 nm Radius aufgeteilt. Jede Kugel wurde während der Verfeinerung entweder dem Lösungsmittel, dem Protein- oder dem RNS-Anteil zugeschrieben. Unabhängige Simulationen mit unterschiedlichen Startkonfigurationen gaben sehr ähnliche Resultate. Das endgültige Modell ist in Abbildung 58 abgebildet. Es zeigt die Regionen, wo es mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Protein oder RNS gibt. 17 Proteine, deren Kristallstruktur bekannt ist, können in Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Methoden positioniert werden. Dieses Modell sollte auch bei der weiteren Interpretation der Kristallstrukturen des 70S-Ribosoms und seiner 50S und 30S Untereinheiten, die in diesem Jahr erschienen sind, nützlich sein.

Das zweite, eine Studie der Teilchengrößenabhängigkeit der thermischen Eigenschaften von Lipid-Nanopartikeln der Universität Jena, ist ein Beispiel dafür, dass manchmal angewandte Projekte auch zu grundlegenden Erkenntnissen führen.

Diese Nanopartikel werden als potenzielle Arzneimittelträger erforscht. Die Ergebnisse der Röntgenmes-

sungen zeigen, dass die getrennten DSC („Differential Scanning Calorimetry“) Signale während der Aufheizung einer Suspension von Trimyristin-Nanopartikeln auf das Schmelzen von Teilchen, die sich in der Größe nur um eine Einheitszelle unterscheiden, zurückzuführen sind. Die große Ausdehnung der Gitterkonstanten bei kleineren Teilchengrößen zeigt auch, dass die klassische Oberflächenthermodynamik bei Teilchen, die nur einige Einheitszellen groß sind, nicht mehr anwendbar ist.

## Röntgenabsorptionsspektroskopie

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 Oxidationszustandes 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 Nutzer-Interfaces. Dazu wurde ein neues Si(111) 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 ein neuer Regelkreis für die Stabilisierung des Monochromator Detunings den Nutzern 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%.

Von der Vielzahl der im Berichtsjahr durchgeführten Projekte wird hier ein internes Projekt skizziert.

Das Metalloenzym CO-Dehydrogenase aus *Oligotropha carboxidovorans* ist ein molybdänhaltiges 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. Folgerichtig 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. Mit diesen Proben wird im Jahre 2000 die Funktion aufgeklärt werden.

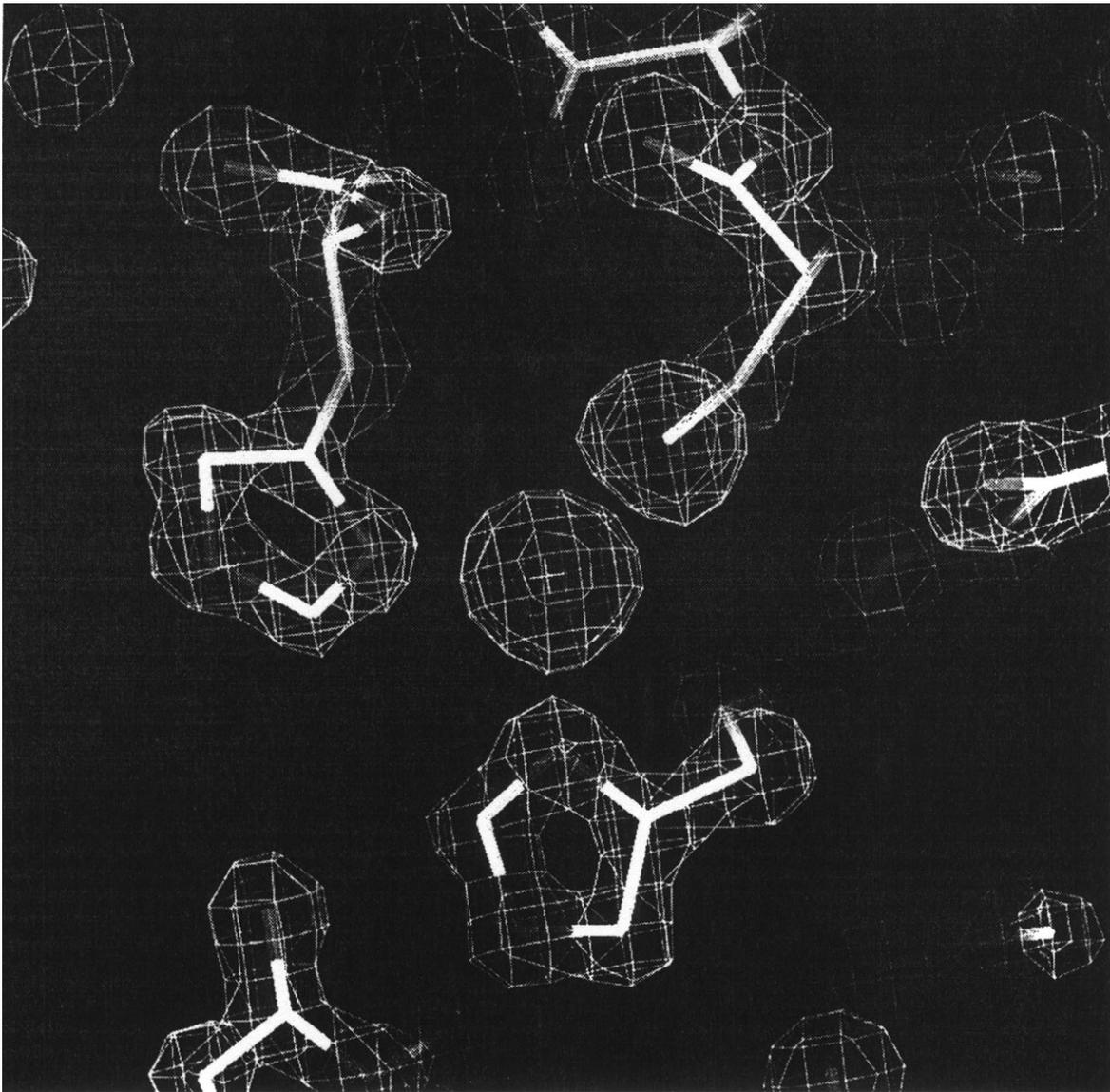


Abbildung 62: *Plastocyanin von Populus nigra* (Dimitrov et al., 1999): Ausschnitt aus der Elektronendichteverteilung, die unmittelbar aus experimentellen Strukturfaktoren mit MAD-Phasen bei 1.3 Å Auflösung berechnet wurde. Zum Vergleich wurde ein Modell überlagert, das einer konventionellen Verfeinerung nicht-resonanter Daten bei extrem hoher Auflösung (0.85 Å) entstammt.

# 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 in Bakterien 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-zeitaufgelösten Röntgenbeugung

ein. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von Methoden anomaler Phasenlösung und ihre Anwendung auf de-novo-Bestimmungen von Proteinstrukturen. Die Gruppe betreibt eine Messstation an der Wiggler-Strahlführung BW6 an DORIS.

Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten lag bei der Aufklärung der Struktur-Funktionsbeziehungen von Haemproteinen, insbesondere der Bindung von Kohlenmonoxid an Myoglobin. Die Affinität für die Bindung dieses Liganden ist beim Myoglobin um mehrere Größenordnungen geringer als bei freien Porphyrinverbindungen; dies ist von erheblicher physiologischer Bedeutung. In Lehrbüchern wurde die geringere Bindungsaffinität durch eine gewinkelte Geometrie der Bindung des CO an das Eisenatom der Haemgruppe erklärt; die Verzerrung im Vergleich zur Linearität dieser Bindung in Porphyrinverbindungen wurde dem Einfluss der Proteinumgebung zugeschrieben. Diese Interpretation gründete sich auf frühere Kristallstrukturanalysen.

Der Arbeitsgruppe gelang es erstmals, diese und eine Reihe anderer Strukturen des Myoglobin bei ultrahoher Auflösung (1.15 Å) zu bestimmen; von besonderer Bedeutung war dabei, dass dies bei Zimmertemperatur möglich war. Wie sich zeigte, ist die Fe-CO-Bindung nahezu linear und der in Porphyrinverbindungen sehr ähnlich. Der sterische Mechanismus der Hemmung der CO-Bindung an das Protein konnte aufgeklärt und damit eine der ältesten Problemstellungen in der Biophysik gelöst werden. Darüber hinaus zeigte es sich, dass dynamische Aspekte eine zentrale Rolle spielen. Konzentrierte Bewegungen ausgedehnter Teile des Proteins sowie der Haemgruppe sind erforderlich, um dem CO-Liganden den Zugang zur aktiven Bindungsstelle zu ermöglichen.

In einer Reihe weiterer Experimente, bei denen Schockgefrieretechniken eingesetzt wurden, wurden diese Bewegungen in der Proteinmatrix und die Wechselwirkung mit dem Liganden in intermediären Zuständen

untersucht. Zur Aufklärung der Zeitfolge, in der die Zwischenzustände bevölkert werden, wurden Verfahren zeitaufgelöster Beugung in Verbindung mit Laseranregung auf einer Zeitskala von Nanosekunden genutzt; diese Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

Ein anderer Schwerpunkt lag bei der weiteren Entwicklung theoretischer und experimenteller Methoden der Phasenbestimmung mit Hilfe multipler anomaler Dispersion (MAD). In Verbindung mit Kryotechniken ist es in der Regel möglich, eine neue Proteinstruktur auf der Grundlage von resonanten Beugungsmessungen an einem einzigen Kristall zu lösen, und dies oft innerhalb weniger Tage. Bei hinreichend hoher Auflösung können anomale Phasen sehr präzise bestimmt werden. Abbildung 62 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer Anwendung auf Plastocyanin, einem Protein, das an Pho-

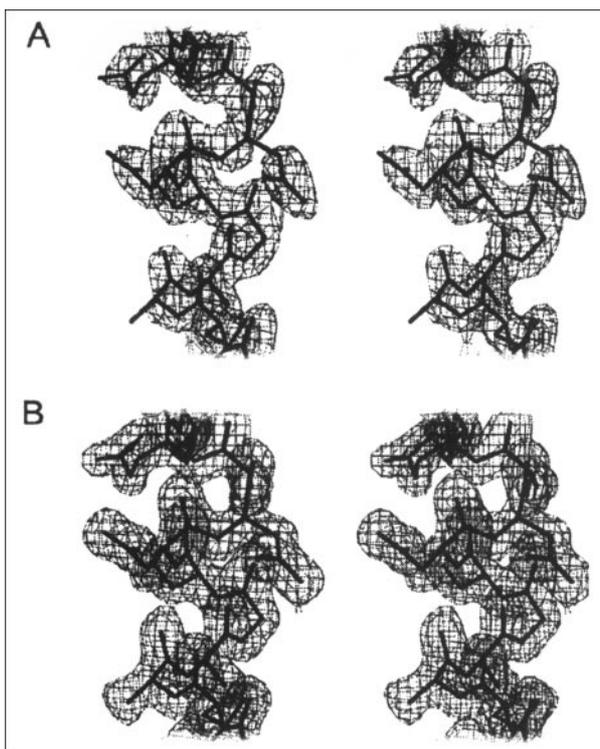


Abbildung 63: *Cytochrom-c-Nitritreduktase* von *S. deleyianum* (Einsle et al., 1999): (A) zeigt einen Ausschnitt aus der Dichteverteilung unmittelbar nach MAD-Phasierung, (B) nach der anschließenden Verfeinerung bei 1.9 Å Auflösung. Das Modell zeigt die homodimere Struktur, die insgesamt 15 Haemgruppen enthält.

tosyntheseprozessen beteiligt ist, bei 1.3 Å Auflösung. Die Elektronendichteverteilung, die in diesem Fall unmittelbar aus den experimentell bestimmten Beträgen und Phasen der Strukturfaktoren berechnet wurde, weist bereits ohne Verfeinerung einen sehr hohen Kontrast und hohe Qualität auf. Auf diese Weise ist es im Prinzip möglich, Proteinstrukturen gänzlich ohne einschränkende Annahmen („Restrains“) bezüglich der geometrischen und energetischen Parameter aufzuklären.

MAD-Verfahren haben bereits jetzt enorme Bedeutung sowohl für die Grundlagenforschung als auch für die industrielle Forschung und Entwicklung. Diese Bedeutung wird weiter zunehmen, insbesondere auch in der (strukturellen) Genomik. Am BW6 konnte im vergangenen Jahr eine Reihe von Strukturen hoher und überaus aktueller biologischer Relevanz gelöst werden. Abbildung 63 zeigt ein Beispiel, die *Cytochrom-c-Nitritreduktase* (Einsle et al., 1999); dieses bakterielle Enzym wandelt Nitrit in Ammoniak um. Ein weiteres Beispiel stellt die Struktur der membranbindenden Domäne des menschlichen Koagulationsfaktors V dar (Macedo-Ribeiro et al., 1999).

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

## 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. Weitere Untersuchungen betreffen die Dynamik zellulärer Bewegungs-, Polymerisations- und Transportprozesse sowie die Rolle des Mikrotubuli-assoziierten Proteins Tau in der Alzheimer-Krankheit.

Mikrotubuli sind hohlzylindrische Proteinfasern, die in vielen eukaryontischen Zellen nachgewiesen wurden. Sie sind Teil des sogenannten Zytoskeletts, das die Zellform und die räumliche Organisation subzellulärer Strukturen bestimmt. Mikrotubuli wirken aber auch an

vielen Transportprozessen mit, teils direkt aufgrund ihrer eigenen Dynamik, teils indirekt als Transportschienen für Motorproteine wie Kinesin und Dynein. Mikrotubuli bestehen aus einem globulären Protein, dem Tubulin, das unter physiologischen Bedingungen spontan zu Mikrotubuli polymerisiert. Ihre Eigenschaften werden durch eine Reihe von Mikrotubuli-assoziierten Proteinen (MAPs) beeinflusst, die an der Oberfläche der Mikrotubuli binden.

Die genaue Funktion der MAPs ist noch nicht bekannt. MAP2 und Tau, zwei Proteine, die den größten Teil der MAPs im Gehirn darstellen, sind an der Stabilisierung der Mikrotubuli beteiligt und regeln deren mechanische Eigenschaften, die Organisation der Mikrotubuli in größere Verbände und die Wechselwirkung der Mikrotubuli mit Motorproteinen und anderen Mikrotubuli-assoziierten Proteinen.

Eine anomale Aggregation des Tau-Proteins in der Alzheimer-Krankheit führt unter anderem auch zum Zusammenbruch der Mikrotubuli und zum Absterben der Neuronen. Um den Einfluss von MAPs auf die Bündelung der Mikrotubuli zu untersuchen, wurden

Mikrotubuli in Lösung durch Zentrifugation verdichtet und die dadurch erzielte Packung der Mikrotubuli mit Hilfe der Kleinwinkelstreuung von Synchrotronstrahlung analysiert. In Abwesenheit von MAPs können Mikrotubuli bereits durch moderate Zentrifugation zu dichten Bündeln gepackt werden. MAP2 beeinflusst die Bündelung der Mikrotubuli empfindlich. Mit zunehmender Konzentration von MAP2 muss eine immer längere und intensivere Zentrifugation aufgebracht werden, um den Widerstand der MAPs gegen eine dichte Packung zu überwinden. Diese Ergebnisse zeigen, dass die MAP-Proteine unter anderem die Rolle von „Raumfüllern“ haben, die dafür sorgen, dass in den Nervenzellen der Platz um die Mikrotubuli herum offen bleibt, um Transportvorgänge zu ermöglichen.

Das Motorprotein Kinesin gewinnt Energie aus der Hydrolyse von ATP zu ADP und setzt diese in gerichtete Bewegung entlang der Mikrotubuli um. Die Kopf- oder Motordomäne der schweren Kette des Kinesin ist sowohl für die Wechselwirkung mit Mikrotubuli als auch für die ATPase-Aktivität verantwortlich. In der Arbeitsgruppe „Zytoskelett“ wurden Kinesine aus verschiedenen Organismen und insbesondere Konstrukte mit der

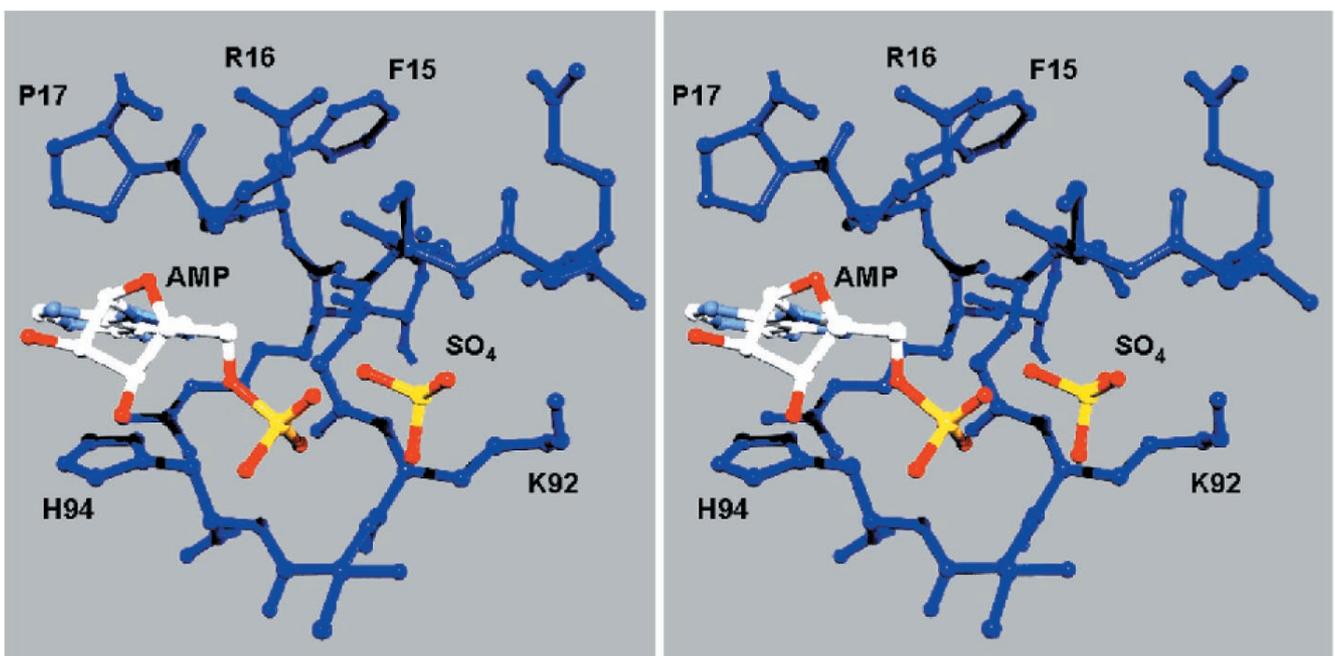


Abbildung 64: Stereobild der Nukleotidbindungstasche des Motorproteins Kinesin.

Motordomäne und verschiedenen langen Bereichen der sich anschließenden Stab-Domäne kloniert, in Bakterien exprimiert und in reiner Form dargestellt. Vor einiger Zeit ist es gelungen, die Röntgenstruktur eines monomeren und eines dimeren Konstruktes aus Rattenkinesin zu bestimmen. Beide Strukturen zeigen die Motordomäne in dem Zustand nach der Hydrolyse des ATP zu ADP. Um den Zustand vor der Hydrolyse oder einen Zwischenzustand zu bestimmen, wurde Kinesin in verschiedenen Pufferbedingungen mit diversen Nukleotid-Analogen kristallisiert. Die Analyse der Kristallstrukturen zeigte, dass das Motorprotein in allen bisher erhaltenen Kristallen dieselbe Konformation einnimmt (Abb. 64). Daraus wird geschlossen, dass die Konformationsveränderung für die Krafterzeugung erst dann erfolgt, wenn das Motorprotein an seiner Zielstruktur, den Mikrotubuli, andockt.

## Struktur der Ribosomen

Ribosomen sind die universellen Zellorganellen, an denen der elementare Prozess der Proteinbiosynthese, das heißt die Übersetzung des genetischen Codes, stattfindet.

Die prokaryotischen Ribosomen bestehen aus zwei Untereinheiten unterschiedlicher Größe, die entsprechend ihren Sedimentationskoeffizienten 50S bzw. 30S genannt werden. Die große 50S Untereinheit hat ein Molekulargewicht von 1.45 Millionen Dalton und enthält neben 38 Proteinen zwei RNA-Ketten (5S und 23S) mit insgesamt 3000 Nukleotiden. Die kleine 30S Untereinheit dagegen besitzt ein Molekulargewicht von 0.85 Millionen Dalton und besteht aus 20–21 Proteinen und einer RNA-Kette (16S) mit etwa 1500 Nukleotiden.

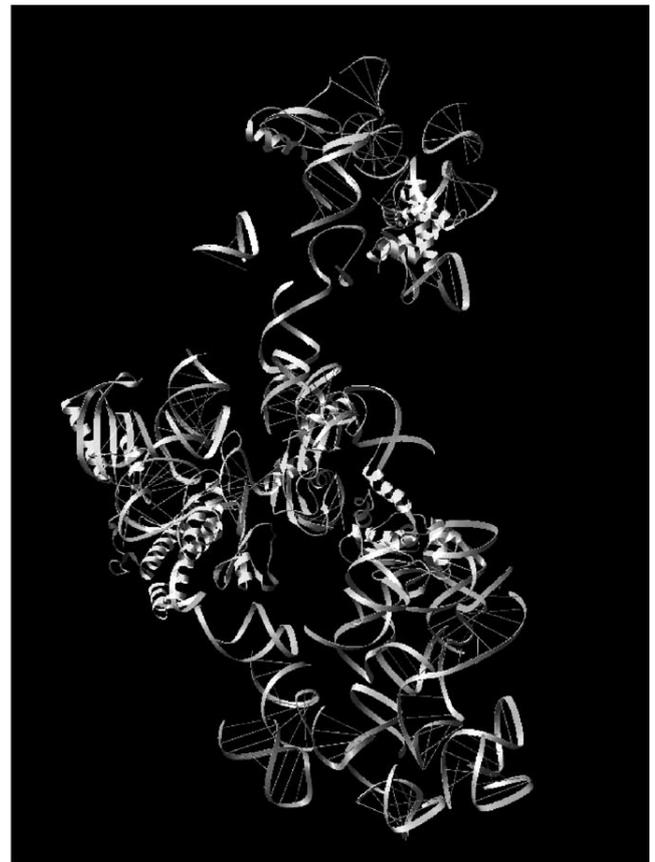
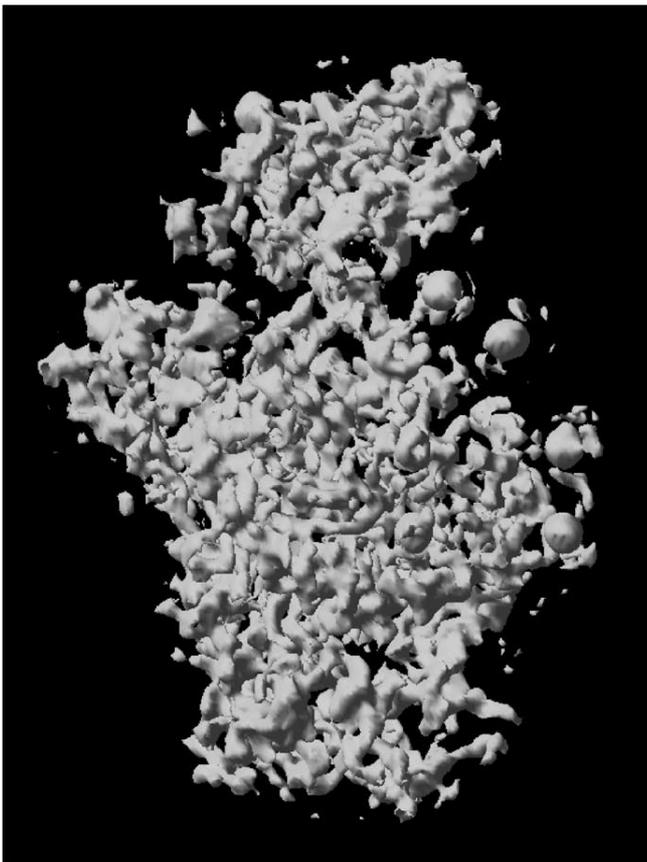


Abbildung 65: Struktur der 30S Untereinheit des Ribosoms aus *Thermus thermophilus*; links: Elektronendichte (Auflösung  $\sim 4.5 \text{ \AA}$ ), rechts: Strukturmodell mit einem Teil der 16S RNA und mit allen ribosomalen Proteinen, soweit deren Struktur bekannt ist.

Im Zentrum der derzeitigen Untersuchungen stehen die kleine Untereinheit von *Thermus thermophilus* (T30S) und die große Untereinheit von *Haloarcula marismortui* (H50S), zweier Bakterienarten, die unter extremen Lebensbedingungen vorkommen.

Die H50S-Kristalle wachsen als dünne Plättchen mit Dimensionen von etwa  $300 \times 300 \times 8 \mu\text{m}$ . Obwohl diese Kristalle bis zu einer Auflösung von  $2.7 \text{ \AA}$  streuen, ist die Bestimmung der Kristallstruktur problematisch. Die Kristalle weisen ein sehr geringes Maß an Isomorphie auf und sind trotz ihrer geringen Dicke häufig in Schichten gewachsen, was die Datenqualität wesentlich beeinträchtigt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass in Richtung der C-Achse kaum Kristallkontakte vorhanden sind, was sowohl die geringe Dicke der Kristalle als auch den geringen Isomorphiegrad und ihr Diffraktionsverhalten zu erklären vermag.

Die 30S Partikel sind aufgrund ihrer Funktion bei der Proteinbiosynthese in sich flexibel. Dies hat anfänglich dazu geführt, dass die T30S Kristalle eine Auflösung von  $10\text{--}12 \text{ \AA}$  nicht übertroffen haben. Elektronenmikroskopische Untersuchungen der 30S Untereinheiten haben ebenfalls gezeigt, dass die Population der 30S Partikel sehr inhomogen ist. Die Derivatisierung mit einem Wolfram-Komplex hat offensichtlich zu einer Stabilisierung der 30S Partikel im Kristallgitter geführt, denn damit konnte eine dramatische Verbesserung der

Auflösung erzielt werden, so dass Daten bis zu einer Auflösung von etwa  $3 \text{ \AA}$  gesammelt werden konnten.

Bislang konnte eine Elektronendichte mit einer Auflösung von etwa  $4.5 \text{ \AA}$  konstruiert werden (Abb. 65 links). Die Elektronendichte ist in grober Übereinstimmung mit elektronenmikroskopischen Daten, aber naturgemäß sehr viel detaillierter. So konnten inzwischen der größere Teil der 16S RNA sowie alle ribosomalen Proteine, deren Struktur bekannt ist, in die Elektronendichte modelliert werden (Abb. 65 rechts).

Die Zuordnung zwischen der Sequenz der RNA und dem Modell, das aus den kristallographischen Daten gewonnen wurde, ist nicht eindeutig. Zwar kann man sich auf eine immense Bibliothek biochemischer Daten berufen, aber die Daten sind häufig nicht genau genug, um auf molekularer Ebene eine präzise Zuordnung zu gewährleisten. Daher wurde versucht, ganz spezifische Stellen der 30S Untereinheit mit Schweratomen zu markieren. Dies kann entweder durch die direkte Derivatisierung ribosomaler Komponenten geschehen, oder durch die Markierung von funktionellen Trägern, die eine hohe Affinität besitzen. Mögliche Kandidaten für diese Prozedur sind Antibiotika, komplementäre DNA-Stränge (cDNA), tRNA oder andere Faktoren, die unmittelbar in die Proteinbiosynthese involviert sind. Auf diese Art und Weise konnten verschiedene RNA-Ketten, die Positionen des 3'-Endes der RNA sowie zweier Cysteine, die zu den ribosomalen Proteinen S11 und S13 gehören, bestimmt werden.

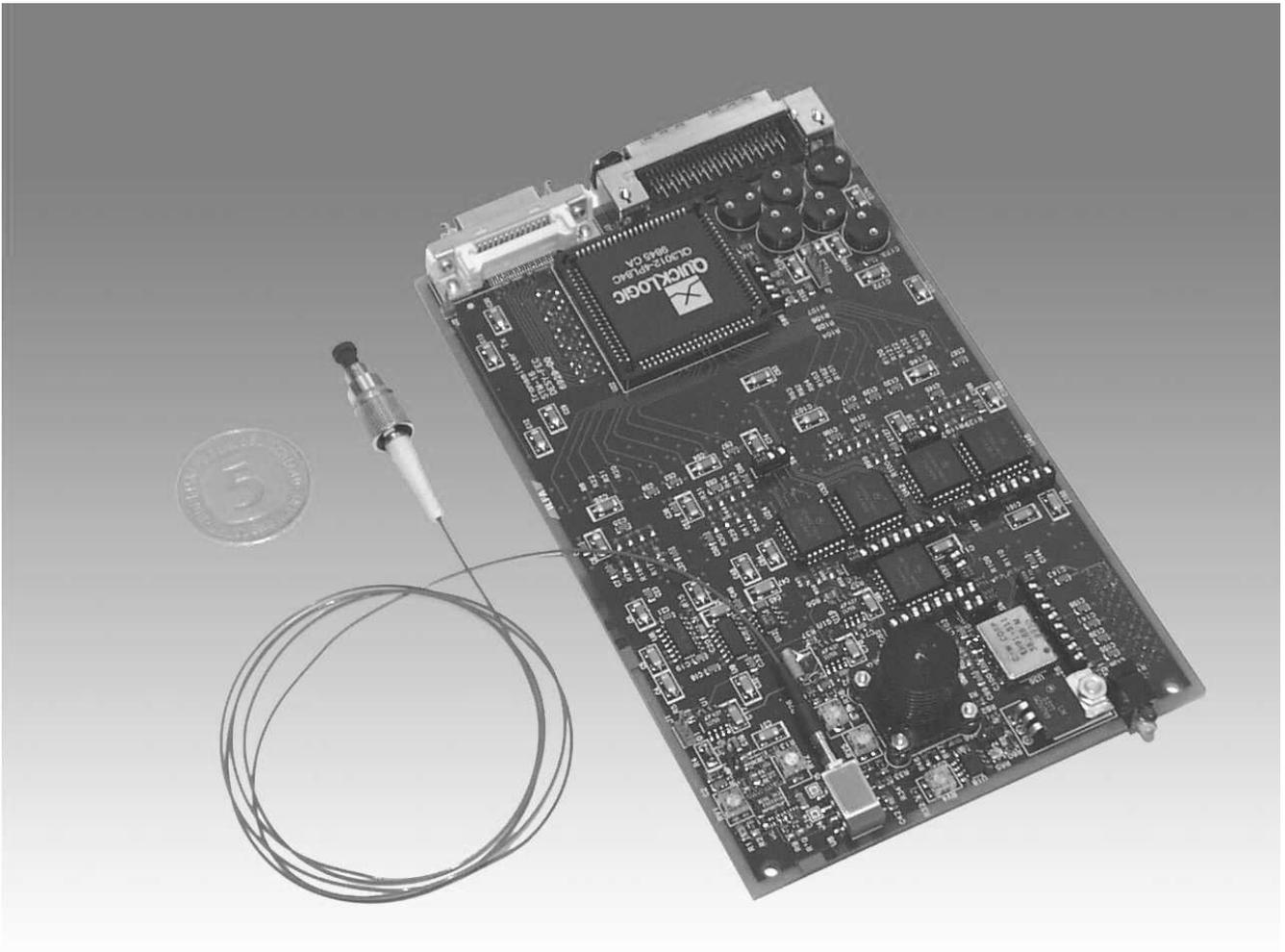


Abbildung 66: 2.488 Gbit/s-Transmitter zur Messdatenübertragung im Si-Driftdetektor-System.

# 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 für spezielle Softwareentwicklungen (FEE).

## Service-Tätigkeiten

Die Service-Gruppe (FEPOS) führte mehr als 840 Reparaturen an elektronischen Geräten für die verschiedenen DESY-Gruppen durch; der Anteil an Reparaturen an EDV-Komponenten ist dabei deutlich gestiegen und lag im Berichtsjahr bei 63%.

Neben der Verwaltung des Elektronik-Pools und der Organisation des Geräte-Verleihs wurde von FEPOS die Aufgabe wahrgenommen, im Rahmen der Altgeräteverwaltung für eine sinnvolle Weiterverwendung nicht mehr benötigter Elektronik zu sorgen.

Von zwei Mitarbeitern wurden Tätigkeiten für den Z-Bereich ausgeführt und zunehmend Aufgaben im Zusammenhang mit WindowsNT übernommen; der Schwerpunkt lag vor allem in der Einführung von WindowsNT in der Verwaltung und in der Administration in Zusammenarbeit mit der NT-Projektgruppe.

Die Betreuung der Audio- und Video-Anlagen in den Hörsälen und Seminarräumen lag in den Händen von FEPOS und FEA, und es wurde eine Reihe von Erweiterungen und Modernisierungen durchgeführt.

Weiterhin wurden teilweise sehr umfangreiche Tätigkeiten durchgeführt auf den Gebieten Terminalserver, ISDN, technische Betreuung der Videokonferenzanlage (FEA), Wartung von ZEUS und HERA (FEB), Rufbereitschaft für HERA (FEB), sowie Bestückungs- und Bonddienstleistungen für H1 und TTF (FEC).

Die Anforderungen an das von der Gruppe FEA betreute EDA-System „Mentor Graphics“ sind im Berichtsjahr im normalen Umfang gestiegen und konnten ohne größere Investitionen in die Server-Hardware befriedigt werden. Zur Zeit gibt es etwa 20 Benutzer aus verschiedenen Gruppen, die das Mentor-System benutzen.

Die existierenden Server sind damit voll ausgelastet, der Anschluss weiterer X-Terminal-Arbeitsplätze (Standard-PCs unter WindowsNT mit X-Terminal-Software) würde eine Erweiterung der Server-Installation erforderlich machen.

Der unter anderem aus Sicherheitsgründen notwendige Übergang auf das jetzt aktuelle Betriebssystem SOLARIS 2.7 wurde auf allen Servern durchgeführt.

Auf dem Gebiet der Ausbildung wurden ein Auszubildender (FEPOS), mehrere Praktikanten aus verschiedenen Gruppen sowie die DESY-Auszubildenden auf dem Gebiet der Elektronik (FEA) betreut.

## Projekte

### HERA-B „Fast Control“ System

Die Arbeiten für das HERA-B „Fast Control“ System (FCS) beanspruchten auch in diesem Jahr einen Teil der Kapazität der Gruppe FEA. Das FCS ist ein zentraler Teil des Datenerfassungs-Systems des HERA-B Experiments. Es dient unter anderem zur hochgenauen (Jitter und Skew < 500 ps) Verteilung des von der Maschine gelieferten Bunch Crossing Signals an etwa 250 Crates am Detektor, zur Verarbeitung und Weiterverteilung der vom First Level Trigger erzeugten Information, sowie zur Behandlung der „Slow Control“ Anweisungen wie Starten und Stoppen der Datennahme, Erzeugung von Statistik-Informationen und

Funktionsüberwachung der Datennahme-Module. Neben der Durchführung verschiedener Modifikationen wegen geänderter Anforderungen wurde eine Reihe von zusätzlichen Funktionen implementiert, um eine bessere Überwachung der Datenübertragung und die Suche nach eventuellen Fehlern in anderen Modulen zu erleichtern. Die Produktion und Auslieferung sämtlicher für das Experiment angeforderter Module (etwa 250 „Tochter-Module“ und 250 „SHARC-Module“) wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

### Detektorkarte für den Strahlenschutz

Es wurde ein Konzept für die Strahlenschutzgruppe (D3) erarbeitet, wie die veraltete und zunehmend schwerer zu wartende Strahlenschutzanlage erneuert werden kann. Die in diesem Zusammenhang im Vorjahr in Zusammenarbeit mit den Gruppen Strahlenschutz und FEE von der Gruppe FEB entwickelte Frontendkarte zum Einbau in die Strahlenschutz-Detektoren erwies sich als so empfindlich, dass sie zur Überwachung des Testbeschleunigers in Zeuthen eingesetzt werden kann. Ein System aus vier Kammern mit Elektronik wird für den Einsatz in Zeuthen vorbereitet. Dies ermöglicht auch den Langzeittest eines Systems, welches das existierende Strahlenüberwachungssystem bei DESY ersetzen kann.

### Transientenrekorder

Bei HERA und TTF stellt sich oft die Aufgabe, die Ursache für Fehlerzustände eindeutig zu erkennen. Dazu dient die Erfassung schneller Vorgänge, analog oder digital, synchron zu einem Taktsignal, das einheitlich für die ganze Maschine ist. Da die Signalquellen oft nur an weit verstreuten Stellen auftreten und der hochohmige Transport dieser Signale nicht ohne große Qualitätsverluste möglich ist, wurde von den Gruppen FEB und FEA ein Transientenrekordersystem entwickelt, bei dem die Signalkonversion vor Ort durchgeführt wird und Signale nur digital übertragen werden. Die Konversion erfolgt synchron zu einem externen Takt oder mit einer einstellbaren Taktrate (maximal 100 kHz) mit 12 Bit Auflösung für analoge Werte. Die Werte, Zählraten oder logischen Zustände werden in einen 8 k tiefen

Speicher geschrieben. Die geforderten Geräte wurden gefertigt, getestet und an verschiedenen Stellen, zum Beispiel von MHF-p, in Betrieb genommen. Es stehen neben einer Anzahl von „Tastköpfen“ auch mehrere Typen von Datensammel- und Triggereinheiten zu Verfügung. Zur Zeit wird die Entwicklung eines Tastkopfes weiter getrieben, der transiente Signale an den Klystron-Netzgeräten von HERA auch während einer Abschaltung messen kann. Die dabei auftretenden Spannungen von etwa 30 kV stellen ein besonderes Problem dar, namentlich für die Versorgung des Tastkopfes. Eine Lösung mit einem Transformator musste aus Platzgründen, wegen des hohen Gewichts und der Kosten verworfen werden. Erste Versuche mit einer kapazitiven Stromversorgung zeigen erfreuliche Ergebnisse; die elektrischen Rückwirkungen sind akzeptabel.

### Monochromator-Stabilisierung

Für HASYLAB wurden von der Gruppe FEB in Zusammenarbeit mit HASYLAB digitale Stabilisierungen der Röntgenstrahl-Monochromatoren entwickelt, gefertigt und in Betrieb genommen. Die erzielbare Regelgenauigkeit hängt hauptsächlich von der Trägheit der Regelstrecke und der Qualität der Strahlintensitätssignale ab, wie im Jahresbericht 1999 von HASYLAB geschildert wurde. Die Stabilisierungen (DMOSTAB) sind an DORIS (HASYLAB und EMBL) sowie am ESRF im Einsatz. Da es auch Anfragen von anderen Labors gab, laufen zur Zeit Lizenzverhandlungen mit einer Elektronikfirma im Hamburger Raum.

### Temperaturüberwachung für HERA

Im Rahmen der Luminositätserhöhung werden zur Überwachung der Synchrotronstrahlungs-Absorber in HERA von mehreren Gruppen Temperatursonden benötigt, an deren Entwicklung die Gruppe FEB arbeitet. Aufgabe der Elektronik ist es, rechtzeitig Übertemperaturen zu entdecken und gegebenenfalls den Beschleuniger HERA-e abzuschalten. Strahlenresistenz, erhöhter Temperaturbereich, Wartbarkeit, sichere Datenübertragung, einfache Montage und Ausfallsicherheit sind daher von großer Bedeutung. Als Sensor wurden vom Anwender Widerstandssensoren (Pt100) vorgegeben. Kommerzielle Temperatúrauslesen scheiden

aus Sicherheitsgründen und wegen mangelnder Strahlungsresistenz aus. Wegen des geringen Rauschabstandes, der geforderten Genauigkeit von wenigen Grad bei Betriebstemperaturen von bis zu 500 °C und des Strahlungspegels ist ein Verstärker mit eingebautem Digitalisierer nahe am Sensor unter dem Abschirmbeton gewählt worden.

Abbildung 67 zeigt einen Prototyp des Digitalisierers, der auf einer DIN-Schiene im Elektronikkanal montiert werden kann.

Die digitalen Signale laufen auf einer eigenständigen digitalen Elektronik auf, die die aktuellen Werte im 100 ms Takt (Vielfaches von 20 ms) mit ladbaren Maskenwerten vergleicht. Jede Temperatur kann jederzeit abgefragt und der Zustand des Maskenvergleichs beobachtet werden. Wird eine Schwelle über- oder unterschritten, so öffnet ein Relaiskontakt. Die Schwellen werden vom Kontrollsystem via Intranet in die Hardware geschrieben bzw. daraus ausgelesen. Der lokale Rechner übernimmt auch die Kommunikation mit den Archivrechnern bei HERA. Eine Speichertiefe von vielen Minuten lässt sich leicht verwirklichen. Bei Bedarf kann die gemessene Temperaturverteilung benutzt werden, um die vermutete Lage des Strahlenfächers zu errechnen.



Abbildung 67: Prototyp des Digitalisierers (HERA Temperaturüberwachung).

Zur Zeit befindet sich die erste Lieferung der Eingangswandler im Prüffeld. Die digitale Elektronik und das Rechnersystem werden vorbereitet für den Einbau in den Beschleuniger ab September 2000.

## Silizium-Driftdetektorsystem

FEC beteiligt sich seit Mitte 1998 an einem Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines Silizium-Driftdetektor-Systems für röntgenholographische und EXAFS-Experimente. Im vergangenen Jahr wurden zusammen mit Mitarbeitern des HASYLAB und des Halbleiterlabors des MPI entsprechende Feldversuche mit einem 7-zelligen Prototypensystem abgeschlossen (siehe HASYLAB-Jahresbericht), deren Resultate in die Entwicklung eines 120-zelligen Detektorsystems münden. Im Rahmen dieser Messungen konnte die Eignung analoger Systemgrößen (Koppelkapazität zum Detektor, Zeitkonstanten der ladungsempfindlichen Vorverstärker- und Filterstufe) verifiziert werden, die nunmehr im Chipdesign Anwendung finden.

Das aufgeführte Blockschaltbild (Abb. 68) zeigt die erforderliche Systemumgebung, deren modularer Aufbau auch einen Ausbau auf mehr als 1000 Kanäle sicherstellt. FEC bearbeitet alle hier gezeigten Baugruppen und Module mit Ausnahme der Detektorarrays.

In Zusammenarbeit mit Mitarbeitern von ZM31 (Technische Infrastruktur DESY) wurde eine erste Serie empfindlicher Graphit-Gehäuseteile mit einer Fertigungstoleranz von unter 50 µm gefertigt. Analytische Feldberechnungen und numerische Feldsimulationen, die in Zusammenarbeit mit MPY durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass sich die elektrischen Verbindungen zwischen Detektor und Chip mittels flexibler Anschlussfolie und AlN-Dünnschichtkeramik mit etwa 15 µm breiten Leiterbahnen bei minimalen Abständen von etwa 30 µm hinreichend parasitärarm realisieren lassen: Die Koppelkapazität zwischen benachbarten Leitungen beträgt maximal etwa 60 fF, die Streukapazität einer Signalleitung gegen Masse erreicht 1.4 pF. Induktive Einflüsse können aufgrund der endlichen Spektralkomponenten bis etwa 3 MHz vernachlässigt werden. Numerische Berechnungen zum thermischen Modulverhalten, die einer Moduloptimierung dienen, wurden experimentell verifiziert. Die Herstellung modulinterner Komponenten,

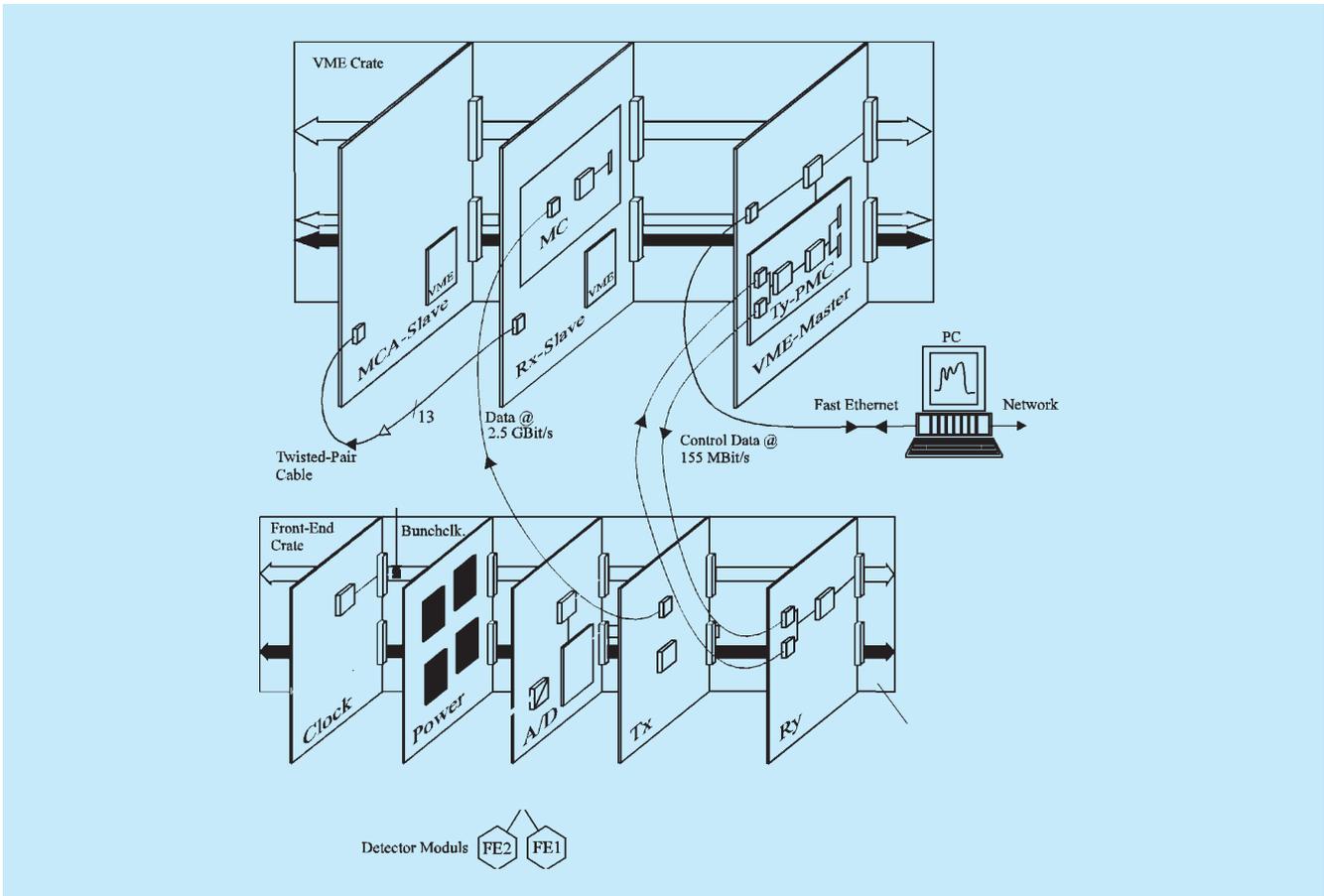


Abbildung 68: Vereinfachtes Blockschaltbild des Si-Driftdetektor-Systems.

wie Detektorarray, elektrische Verbindungskomponenten und Strahlungsschild, sowie die Fertigstellung eines ASIC-Prototyps ist für das kommende Jahr geplant.

Die nachgeschaltete Elektronik besteht aus einem AD-Wandlermodul, einem optischen Übertragungssystem sowie einem Multikanalanalysator und verarbeitet die Daten von insgesamt 120 Detektorkanälen. Das AD-Wandlermodul besteht aus 20 hybrid integrierten 12-Bit-Wandlern mit jeweils einem seriellen Ausgang. Der Wandler arbeitet bei einer Abtastrate von etwa 6 MHz. Im vergangenen Jahr wurden Hybridprototypen erfolgreich getestet. Ein Prototyp der Mutterkarte im Europakartenformat wird in 2000 erwartet. Das Übertragungssystem stellt die Messdatenverbindung zwischen AD-Wandlermodul und dem VME-Multikanalanalysator sicher. Über eine Monomodefaser werden die Daten di-

gital mit einer standardisierten Rate von 2.488 Gbit/s übertragen. Abbildung 66 zeigt die Photographie der Senderschaltung im Europakartenformat. Die Empfängerkarte weist gleiches Format auf und wird als Tochterkarte auf einem VME-Modul betrieben. Die empfangenen und aufbereiteten Daten verlassen die VME-Mutter entweder über eine elektrische Frontplatten-Verbindung zum Multikanalanalysator oder sie werden in einem modulinternen RAM abgelegt und asynchron über den VME-Bus ausgelesen. Im Labor wurden Bitfehlerraten von etwa  $10^{-13}$  erreicht.

Die Systemsteuerung übernimmt ein kommerzielles VME-Mastermodul mit LINUX-betriebem Signalprozessor. Den ablaufsteuernden, bidirektionalen Kontrolldatenverkehr zwischen den detektornahen AD-Wandler- und Transmitter-Modulen und den VME-

Modulen obliegt einem weiteren digitalen optischen Übertragungssystem mit einer Baudrate von 155.52 Mbit/s. Abbildung 69 zeigt die zugrunde liegende Transceiver-Schaltung, die VME-seitig als PMC-Modul ausgelegt wurde. Der Zugriff auf die Steuerdaten erfolgt über den lokalen PCI-Bus des kommerziellen VME-Mastermoduls. Der Multikanalanalysator (MCA, entwickelt in Zusammenarbeit mit FEA) dient der Online-Signalverarbeitung des Eingangsdatenstromes von etwa 233 MByte/s. Im Histogramm-Modus werden Daten von 120 Driftzellen mit einer Auflösung von 4096 Klassen bei einer maximalen Zählertiefe von 33 Bit histogrammiert. Im Rohdatenmodus beträgt die Speichertiefe pro Zelle etwa 11 000 Ereignisse.

Mit den gezeigten Prototypen sowie dem ebenfalls fertiggestellten MCA-Prototyp sind für das kommende Jahr Systemtests geplant. Mit der Entwicklung geeigneter Steuer- und Auswertesoftware wurde bereits begonnen.

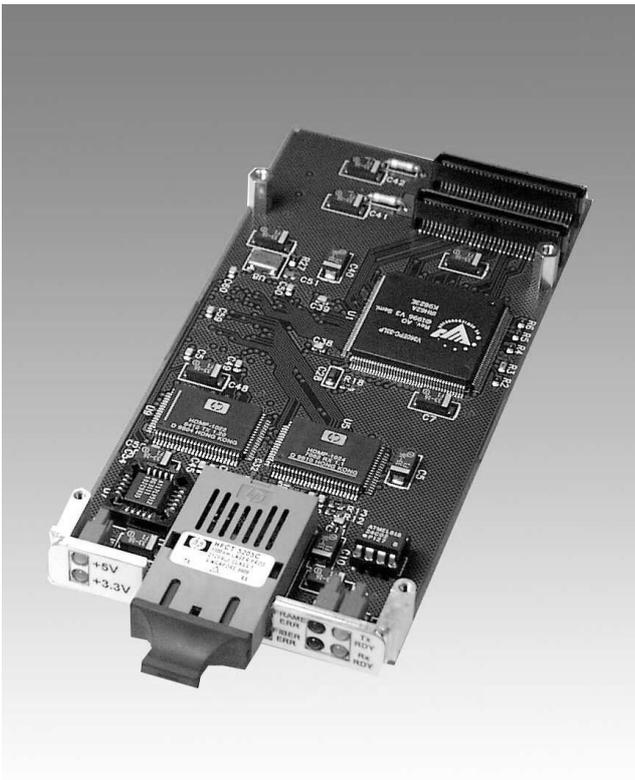


Abbildung 69: 155.52 Mbit/s-Transceiver zur Kontrolldatenübertragung im Si-Driftdetektor-System.

## Diverse Einzelentwicklungen

In Zusammenarbeit mit HASYLAB wurden von der Gruppe FEA verschiedene Versionen von Multikanalanalysatoren (VME, IP) entwickelt. Sie erlauben alle die Aufnahme von Spektren bei gleichzeitiger Möglichkeit der Auslese und sind an die verschiedenen, bei HASYLAB existierenden ADC/TDC-Geräte angepaßt.

Für MPY wurden mehrere Timing- bzw. Triggermodule entwickelt, die im Rahmen der Messungen von Multibunch-Schwingungen zum Einsatz kommen.

## Software-Aktivitäten

Für die meisten der oben erwähnten Entwicklungen wurden von der Gruppe FEE teilweise recht umfangreiche Testprogramme erstellt.

Zur Erleichterung der Tests von VME-Modulen wurde ein Testsystem entwickelt, das über eine interaktiv zu bedienende Benutzeroberfläche verfügt. Es erlaubt die Erzeugung von VME-Zyklen in allen Standard-VME Daten- und Adressformaten, die Darstellung und den Vergleich von eingelesenen Werten und die Generierung von Programmschleifen, ohne dass durch den Benutzer ein spezielles Programm geschrieben werden muß.

Mitarbeiter von FEE waren auch in diesem Jahr wesentlich beteiligt bei der Pflege des VMS-Systems und im Rahmen des WindowsNT-Projekts. Über Einzelheiten dieser Projekte wird an anderer Stelle berichtet.

## Verschiedenes

Im Berichtsjahr wurden wiederum zwei Mitarbeiter von FEA abgestellt für Tätigkeiten bei H1, ein weiterer Mitarbeiter war nahezu vollständig für ZEUS (Micro-Vertex-Detektor, MCX) bzw. D3 (Strahlenschutz-Überwachungsanlage) tätig.

Neben der eigentlichen Entwicklungstätigkeit wurden von FEA umfangreiche Layoutarbeiten (etwa 25 Einzelprojekte) für verschiedene Gruppen, wie FEB, HASYLAB oder HERA-B, geleistet.

# Bibliothek und Dokumentation

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

Die 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 (1999 waren es 201 DESY-Berichte, 6 Diplomarbeiten und 40 Dissertationen, 3 Konferenzabhandlungen, 12 der Internen Berichte und 133 Publikationen in Fachzeitschriften) und führt gemeinsam mit der SLAC-Bibliothek 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 Stanford Linear Accelerator Center SLAC und DESY dokumentarisch bearbeitet, und die Literaturdatenbank HEP, die Dokumente ab Mitte der siebziger Jahre enthält, mit täglicher Aktualisierung erstellt und im WWW zugänglich gemacht.

Als anerkannte Ausbildungsstelle bildet die DESY-Zentralbibliothek Fachangestellte für Medien- und Informationsdienste mit Fachrichtung Bibliothek aus und stellt Praktikumsplätze für Studenten des Bibliothekswesens zur Verfügung. Im Jahr

1999 befand sich eine Auszubildende im zweiten Lehrjahr, zwei Auszubildende haben die Ausbildung aufgenommen. Eine Studentin der Fachhochschule Stuttgart absolvierte ein sechswöchiges Informationspraktikum, eine der Fachhochschule Hamburg ein dreimonatiges Hauptpraktikum für den Studiengang Wissenschaftliche Bibliotheken. Ein Diplom-Physiker absolviert in der DESY-Dokumentation den berufspraktischen Teil der zweijährigen Ausbildung zum Wissenschaftlichen Dokumentar. Die theoretische Ausbildung am Institut für Information und Dokumentation in Postdam hat er im Dezember 1999 abgeschlossen.

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 26 500 Bücher wurden Ende 1999 über den gemeinsamen OPAC (Online Public Access Catalogue) nachgewiesen.

Die Institutsbibliothek im HASYLAB enthält im wesentlichen Literatur zur Festkörperphysik. Der Bestand umfaßt etwa 1100 Bücher (ohne Zeitschriftenbände). Erwerbung und Katalogisierung werden von der Zentralbibliothek durchgeführt. Für die Benutzung gelten laborinterne Regelungen.

	Zugang	Löschungen	Bestand (31.12.1999)
Monographien	992	99	27 366
Gebundene Zeitschriftenbände	1009*	—	25 654
Laufend gehaltene Zeitschriften	19	58**	398***
Zeitschriften (Verwaltung)	1	—	31****
elektronische Zeitschriften	10	29	577

\*Hierin sind 76 Bände für EMBL enthalten

\*\* davon sind 26 Abonnements für EMBL

\*\*\* zzgl. 21 Abonnements von Tages-/Wochenzeitungen

\*\*\*\* davon 12 Abonnements von Zeitungen

Tabelle 1: *Entwicklung des Bibliotheksbestands in 1999.*

Die Bücherei der Abteilung MKS enthielt Ende 1999 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 1800 Leser regelmäßig die Zentralbibliothek. Sie verursachten durchschnittlich 120 Ausleihvorgänge pro Woche. Im nehmenden Leihverkehr wurden 532, im gebenden 273 Literaturbestellungen positiv bearbeitet. Die Entwicklung des Bibliotheksbestands im Berichtszeitraum zeigt Tabelle 1.

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

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

Der HGF-Arbeitskreis Bibliotheks- und Informationswesen führte auch 1999 für die HGF-Einrichtungen Verhandlungen mit Verlagen, Agenturen und Informationsdienstleistern über Konsortialverträge für den gemeinsamen Zugang zu den elektronischen Versionen der abonnierten Zeitschriften und zu Literatur- und Faktendatenbanken. Mit der Verlagsgruppe Elsevier wurde der Vertrag im Sommer 1999 unterzeichnet. Er sichert den HGF-Bibliotheken und den Mitarbeitern der HGF-Forschungszentren bis Ende 2001 den Zugang zu 417 elektronischen Zeitschriften. Der im Vorjahr geschlossene Vertrag mit Academic Press wurde zum Jahresende 1999 gekündigt, weil kein Konsens über die Konditionen für den Zugang zu den elektronischen Zeitschriften dieses Verlags ab Januar 2000 erreicht wurde. Insgesamt konnte 1999 auf die Inhaltsverzeichnisse, Kurzfassungen und Volltexte der Veröffentlichungen in 577 elektronischen Zeitschriften zugegriffen werden.

Im Herbst 1999 wurde das Release 12.1 der integrierten Bibliothekssoftware ALEPH-500 installiert. Neben dem Arbeiten mit dem System in Katalogisierung und Ausleihe können, sobald die erforderlichen Daten eingegeben sein werden, auch die Module für die Erwerbung und die Zeitschriftenverwaltung eingesetzt werden. Dies soll im Laufe des Jahres 2000 erfolgen. Die notwendigen Schulungen wurden Anfang Dezember durchgeführt.

## Bibliothek von DESY Zeuthen

Diese Bibliothek wird von 190 Lesern regelmäßig genutzt. Sie konnten sich Ende des Berichtsjahres aus 8196 Monographien, 7424 Zeitschriftenbänden und etwa 3500 Forschungsberichten der letzten drei Jahre informieren. 92 Zeitschriftentitel sind abonniert. 1999 wurden 170 Literaturstellen im nehmenden Leihverkehr besorgt, 80 davon von der Zentralbibliothek in Hamburg.

## 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 1999 hat die Gruppe „Dokumentation“ für die Datenbank HEP 5843 Publikationen in Fachzeitschriften und Konferenzabhandlungen und 12 025 Forschungsberichte und Vorabdrucke klassifiziert und indexiert. 848 Publikationen wurden mit Schlagwörtern vollständig neu in die Datenbank aufgenommen, von weiteren 10 248 Publikationen und 1143 Forschungsberichten wurden, um sie in der Datenbank schnell nachzuweisen, zunächst nur die bibliographischen Angaben erfasst. Für 8276 bereits dokumentierte Berichte wurden nach ihrer Veröffentlichung Publikationsvermerke hinzugefügt.

Die Datenbank ist im 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 im Berichtsjahr weiter vertieft. Anfang März fanden Gespräche mit Mitarbeitern dieser Bibliotheken am CERN statt. Die Bibliothek des CERN und die DESY-Dokumentation prüfen gemeinsam die Möglichkeit des Einsatzes einer Indexierungssoftware zur automatischen Beschlagwortung von elektronisch lesbaren wissenschaftlichen Publikationen in der Hochenergie-/Elementarteilchenphysik.

## Informationsangebot

Der Zugriff auf die Literaturdatenbank HEP ist über das WWW möglich. Über die Web-Seite der DESY-Bibliothek erhält man auch Zugang zum gemeinsamen elektronischen Online-Katalog aller Bibliotheken am DESY, 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 auch 1999 den Zugang zu den Datenbanken des Fachinformationszentrums Energie, Physik, Mathematik in Karlsruhe und zum Fachinformationszentrum Technik in Frankfurt. Hauptnutzer des FIZ Karlsruhe waren Mitarbeiter am HASYLAB, des FIZ Frankfurt die Gruppe Konstruktion.

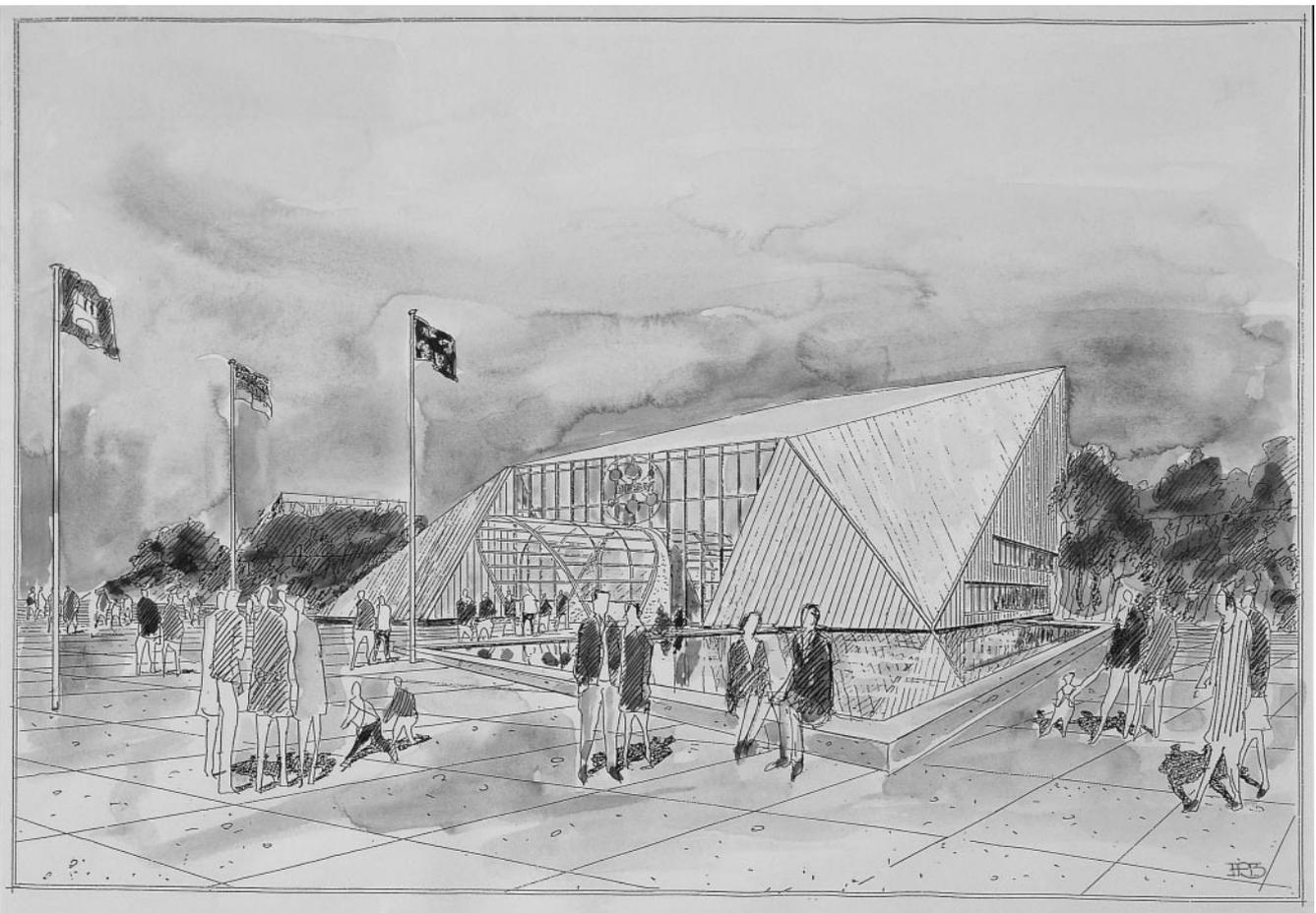


Abbildung 70: Im Jahr 2000 wird in dieser Halle (das Bild zeigt eine Architektenzeichnung) auf einer Fläche von  $1200\text{ m}^2$  die DESY-Ausstellung „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“ gezeigt, zu der 50- bis 80-tausend Besucherinnen und Besucher erwartet werden. Bei diesem „futuristisch“ anmutenden Gebäude handelt es sich um die neue HASYLAB-Experimentierhalle, in der ab 2003 die Forschungen an dem Freie-Elektronen-Laser (TFE-FEL) beginnen werden. Der Bau der Halle wurde vorgezogen, so dass sie vom 1. Juni bis zum 31. Oktober 2000 als Ausstellungsgebäude benutzt werden kann. Der neue Laser wurde von einer Bundesjury als Weltweites Projekt der EXPO 2000 ausgewählt und kann während der DESY-EXPO besichtigt werden.

# Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

**Der Dialog mit der Öffentlichkeit ist eine Herausforderung, die von DESY gern und mit großem Einsatz angenommen wird. Die Abteilung „Presse- und Öffentlichkeitsarbeit“ (PR) erfüllt hier die Funktion einer „Schnittstelle“ und sorgt für den nötigen Informationsfluss, wobei sie stets mit der vollen Unterstützung aller DESY-Bereiche und -Gruppen rechnen kann. Dies betrifft insbesondere die Vorbereitungen für die DESY-EXPO „Licht der Zukunft“.**

**Konkret bedeutet das für die PR-Arbeit, ständig ein aktuelles und vielfältiges Spektrum an Informationsangeboten und Kommunikationsmaßnahmen zu pflegen. Dazu gehört der weit gefächerte Kontakt zu den Medien, die Herausgabe von Informationsschriften für einen breiten Leser- und Interessentenkreis sowie des Wissenschaftlichen Jahresberichts, die regelmäßige Durchführung von Besichtigungen (1999 kamen über 11 000 Besucherinnen und Besucher in 418 Einzelgruppen zu DESY, davon 219 Schülergruppen und 69 Studentengruppen) und die Präsentation des Instituts auf Messen und Ausstellungen. Dazu gehört auch, ständig für allgemeine, von außen an DESY herangetragene Anfragen ansprechbar zu sein sowie die bei DESY arbeitenden Menschen über Neues aus den verschiedenen Bereichen des Zentrums zu informieren.**

**Es werden hier nicht nur die Schwerpunkte der unter der Regie der PR-Abteilung durchgeführten Aktivitäten vorgestellt, sondern auch Maßnahmen, die im Berichtsjahr von anderen DESY-Gruppen realisiert wurden.**

Die volle PR-Konzentration war im Berichtsjahr auf die Vorbereitung der DESY-EXPO „Licht der Zukunft – Light for the New Millennium“ gerichtet, die parallel zur Weltausstellung EXPO 2000 in der Zeit vom 1. Juni bis zum 31. Oktober täglich in Hamburg bei DESY gezeigt werden wird. Hier galt es, den ehrgeizigen Anspruch umzusetzen, eine 1200 m<sup>2</sup> große, multimedial

gestaltete Erlebnis-Wissenschaftsausstellung zu schaffen, die das Interesse eines breiten Publikums weckt. Sie wird zweisprachig angelegt (deutsch/englisch) und ist in den fünf Monaten täglich geöffnet. Es werden 50- bis 80-tausend Besucherinnen und Besucher erwartet, davon etwa die Hälfte Schüler. Unter dem Titel „Licht der Zukunft – Ein 300 Meter langes supraleitendes Röntgenlaser-Mikroskop beim Forschungszentrum DESY“ ist dieses Projekt 1998 von einer Bundesjury als eines der Hamburger Weltweiten Projekte der EXPO 2000 ausgewählt worden. DESY hatte sich entschlossen, hier nicht nur den neuen Tunnel mit den ersten Aufbauten des Freie-Elektronen-Lasers (FEL) zu zeigen, sondern die Gelegenheit zu nutzen, einer breiten Öffentlichkeit Hintergründe und Ziele seiner aktuellen Forschung sowie das Zukunftsprojekt TESLA vorzustellen. Aus diesem Grund wurde der Bau der FEL-Experimentierhalle vorgezogen. Sie liegt logistisch so günstig, dass der Zugang zu der Ausstellung und dem neuen FEL-Tunnel direkt über einen vorhandenen öffentlichen Parkplatz erfolgen kann.

Für die Zeit der Ausstellung wird die Experimentierhalle durch temporäre Ausbauten in einen inneren und einen äußeren konzentrischen Raumbereich verwandelt, der sich über drei Stockwerke erstreckt. Durch diese besondere architektonische Gestaltung ergeben sich in der bis unter das Dach offenen Halle Themenräume, die die Besucher in Ruhe durchwandern können. Die Inhalte der Ausstellung gliedern sich in folgende drei Hauptthemen:

- der neue 300 m lange Röntgenlaser – das „Licht der Zukunft“,
- die aktuelle DESY-Forschung mit HERA und HASYLAB,
- das Zukunftsprojekt TESLA, wobei der Röntgenlaser mit etwa 50% des Darstellungsvolumens den Schwerpunkt bildet.

Alle drei Themen werden in den Informationsniveaus „Neugier“, „Einblick“ und „Wissen“ kommuniziert, so dass ein breites Publikum jeder Altersstufe erreicht wird – vom interessierten Laien ohne physikalische Vorkenntnisse über Lehrer und Schüler bis zum Physikstudenten. Unterschiedliche Ausstellungsmedien sollen die „Neugier“ an den dargebotenen Themen wecken und den „Einblick“ hinter die Forschungskulissen ermöglichen. Dies sind insbesondere

- die Ausstellungswände mit prägnanten Text- und eindrucksvollen Bilddarstellungen, in die auch Vitrinen mit kleinen Anschauungs-Exponaten eingearbeitet sind, zum Beispiel alte Röntgenröhren, ein Teil des Kalorimeters zur Energiemessung von Elektronen und Photonen, das bis 1994 in einem HERA-Detektor im Einsatz war, oder ein gewachsener Silizium-Kristall mit Waver-Platte,
- Original-Exponate und Prototypen aus den Forschungsanlagen von DESY, die für die DESY-EXPO speziell aufbereitet sind und viele Fenster zum Hineinschauen bieten, zum Beispiel eine Strahlführung aus der HASLYAB-Experimentierhalle mit Gitter- und Probenkammern, eine 2 m lange zylindrische Driftkammer mit etwa 32 000 vergoldeten Drähten, die elf Jahre in einem DORIS-Detektor im Einsatz war, druckfeste Glaskugeln mit Photomultipliern, die zu dem Neutrino-Teleskop AMANDA gehören und am Südpol bis zu 2500 m tief ins Eis gelassen werden, die ersten Original-Komponenten in dem neuen FEL-Tunnel – ein 12 m langes Beschleunigungsmodul sowie drei Undulator-Gestelle,
- Hands-on-Experimente zu bei DESY eingesetzten Techniken, wie Reinraum-Staubzählung, Vakuum oder Elektronen-Beschleunigung, und zu Erscheinungen im Alltag, zum Beispiel verschiedene Lichtprojektionen, die Wirkung unterschiedlicher Lichtquellen, der Einsatz von Radiowellen, Infrarotstrahlung oder ultraviolettem Licht,
- eindrucksvolle audio-visuelle Projektionen von nicht direkt beobachtbaren Vorgängen, zum Beispiel der Beschleunigung eines Elektronenstrahls in einem TESLA-Modul oder der Kollision von hochenergetischen Elektronen und Positronen in einem Detektor.

Die „Wissensinseln“ bieten den Besucherinnen und Besuchern die Möglichkeit, das Gesehene und Erlebte entsprechend den individuellen Bedürfnissen zu vertiefen. Dazu gibt es in den unterschiedlichen Themenbereichen der Ausstellung passende interaktive Themen-Terminals oder „Stehbücher“ zum Nachlesen, Zentralstationen, an denen die gesamte Ausstellung virtuell besucht und vertiefende Fragen beantwortet werden, die Bibliothek mit einer Auswahl populärwissenschaftlicher Bücher, CDs und Video-Bildschirmen und – natürlich – Internet-Stationen.

Beim Betreten der Ausstellungshalle werden die Besucher durch den bis zu 10 m hohen inneren konzentrischen Raumbereich „eingefangen“ und auf das Kommende neugierig gemacht mit Darstellungen zu den Themen

- „Licht der Zukunft“: Röntgenquellen, Mikroskope, Laser, Röntgenlaser-Mikroskope,
- „Forschen für die Zukunft“: Menschen und Forschung bei DESY,
- „Das Zukunftsprojekt TESLA“: Design, Technik und Werdegang,
- „TESLA als Präzisionswerkzeug zur Formulierung unseres Weltbildes“: hochenergetische Elektron-Positron-Kollisionen für die Teilchenphysik.

In dem äußeren Raumkomplex werden Einblicke in die aktuellen DESY-Forschungen gegeben:

- Entstehen und Funktionsweise des HERA-Beschleunigers und der HERA-Detektoren,
- die HERA-Ergebnisse im Zusammenhang mit dem Standard-Modell der Teilchenphysik,
- das Forschungsangebot im HASYLAB,
- das AMANDA-Projekt des DESY-Standorts Zeuthen.

Die zweite Ebene der Ausstellungshalle bietet einen Rundgang an, der mit einem Anschauungslehrpfad zu den Begriffen „Licht“, „Strahlung“, „Röntgen“, „Laser“ bis hin zum „Freie-Elektronen-Laser“ beginnt, dann durch eine Original-Interlocktür in den als

HASYLAB-Experimentierbereich gestalteten Raumbereich führt, in dem Methoden und Anwendungsbeispiele aus der Forschung mit Synchrotronstrahlung gezeigt werden. Hier finden sich zum Beispiel Titel wie

- „Muskeln bewegen alles, aber wie bewegt sich der Muskel?“,
- „Sorgt für Bodenhaftung und verschleißt Motoren – Der alltägliche Kontakt mit der Reibung“,
- „Die Form bewahren – wie Hautcremes haltbar bleiben“,
- „Güterverkehr in der Zelle – Molekulare Motoren fahren mit chemischer Energie“,
- „Nicht vergessen! – Den Ursachen der Alzheimer-Krankheit auf der Spur“.

Den Abschluss dieses Rundgangs bildet ein von der Phänomenta, einem Science Center in Flensburg, gestalteter Erlebnisraum „Sensoren und Sinne des Menschen“.

In der dritten Ebene liegt das Lighthouse Café, kombiniert mit Internet-Plätzen, dessen Terrasse auf den Wall des neuen FEL-Tunnels führt. Von dort gelangen die Besucher zum Eingang des Röntgenlaser-Tunnels. Er ist in den ersten 50 Metern schon mit Originalkomponenten ausgestattet und bietet auf dem Rest der Strecke Platz für Hands-on-Exponate, Bildwände und Modelle.

Im Berichtsjahr galt es, die Umsetzung dieses Ausstellungenkonzepts in Gang zu setzen und voranzutreiben.

DESY ist es ein besonderes Anliegen, junge Menschen in die Lage zu versetzen, sich über das TESLA-Projekt zu informieren. Aus diesem Grund hat DESY einen Schulbuch-Verlag mit der Entwicklung von Unterrichtsmaterial zum TESLA-Projekt beauftragt. Es handelt sich um eine dokumentierte Folienmappe zu den Themen „TESLA-Teilchenphysik“ und „TESLA-Röntgenlaser“, die außer einer Serie von Overhead-Folien auch Schülerseiten mit Aufgaben und Hintergrundinformationen für Lehrer enthält. Das Material wird bundesweit allen 4200 Gymnasien, Gesamtschulen und Schulen mit gymnasialer Oberstufe kostenlos zur Verfügung gestellt, und jeder Physiklehrer hat die Gelegenheit, es gegen einen Kostenbeitrag als Broschüre zu bestellen. Im Hinblick auf die DESY-EXPO wurde im Berichtsjahr mit der Produktion des Teils

„TESLA-Röntgenlaser“ begonnen, der im Frühjahr 2000 an die Schulen geschickt werden soll, so dass Lehrerinnen und Lehrer in die Lage versetzt werden, ihre Klasse auf eine Exkursion zur DESY-EXPO vorzubereiten. Er enthält die Basisinformation zu DESY und jeweils acht Unterrichtseinheiten für drei Niveaustufen, die für Physik-Grundkurse und -Leistungskurse geeignet sind. Der Teil „TESLA-Teilchenphysik“ soll Anfang 2001 als Ergänzungslieferung zur Verfügung gestellt werden.

Dirk Rathje, Physik-Diplomand bei DESY und Wissenschaftsjournalist, wurde im November des Berichtsjahres im Rahmen der Verleihung des renommierten Georg von Holtzbrinck-Preises für Wissenschaftsjournalismus mit einer „lobenden Erwähnung“ für seine verständliche und unterhaltsame Web-Reise in die Welt der Quarks ausgezeichnet. Sie ist unter dem Titel „Kworkquark – Teilchenphysik für alle!“ im Internet zu finden: [www.desy.de/Kworkquark/](http://www.desy.de/Kworkquark/).

Besonderen Wert legt DESY auf ein breit gefächertes Informationsangebot für Schüler und Lehrer. Deshalb nahm DESY 1999 nicht nur an der 90. Hauptversammlung des Deutschen Vereins zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU) in Saarbrücken teil, sondern auch an der 46. MNU-Regionaltagung in Bremerhaven. In beiden Fällen stand die Werbung für eine Exkursion zur DESY-EXPO im Mittelpunkt sowie die kostenlose Abgabe verschiedener für den Unterricht geeigneter Medien zu DESY-Themen. Es handelt sich um eine Diskette mit dem interaktiven Programm „Kworkquark – Teilchenphysik für alle“ (seit 1999), Overhead-Folien, Dias, Kopiervorlagen für eine Unterrichtseinheit zum Thema „Standard-Modell“ von Pedro Waloschek und den Video-Film „Billy Beam auf den Spuren der Teilchen“. Insgesamt wurden seit der Einrichtung dieses Dienstes im Jahr 1996 bis Ende des Berichtsjahres Medien an 595 Lehrerinnen und Lehrer verschickt. Der Videofilm wird seit 1994 außerdem über die Landesbildstellen bundesweit im Verleih angeboten. Bis Ende 1999 betrug die Zahl der Vorführungen 1917 mit insgesamt 23 435 Zuschauern.

Unter dem Titel „Zielgruppe Lehrer/Schüler“ richtete die PR-Abteilung einen zweitägigen Workshop für die Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) aus, der im April 1999 auf Initiative der HGF-Pressereferenten bei DESY stattfand. Mit

arbeiterinnen und Mitarbeiter der Helmholtz-Zentren diskutierten mit Vertretern aus den schulischen und hochschuldidaktischen Bereichen ein besonders „öffentlichkeitsrelevantes“ Ziel: Wie und womit kann eine stabile Brücke geschlagen werden vom Zentrum der aktuellen Forschung zum Lernort Schule? Als Beobachterin war eine Wissenschaftsjournalistin eingeladen, die auch den Workshop-Bericht verfasste.

Wie in jedem Jahr war DESY mit einem Stand auf der zehntägigen Verbrauchermesse „Du und Deine Welt“ in Hamburg vertreten. Außerdem präsentierte sich DESY mit der Vorstellung des industriellen HASYLAB-Angebots im Rahmen der „HiTech“-Veranstaltung in der Handelskammer Hamburg, und parallel zu einem Physik-Kongress wurde eine Ausstellung über DESY und das TESLA-Projekt in Bialystok, Polen, gezeigt.

### **PR-Maßnahmen anderer DESY-Gruppen**

DESY Zeuthen veranstaltete im Berichtsjahr einen sehr erfolgreichen Tag der offenen Tür, zu dem knapp 1400 Besucherinnen und Besucher kamen. Außerdem war DESY Zeuthen im Rahmen des Brandenburger Tages der Wissenschaft und Forschung und beim Marie Curie-Tag des Gymnasiums Ludwigsfelde vertreten. Ein besonderes Ereignis war die Vorstellung des AMANDA-Projekts auf einem Stand des Wissenschaftsmarkts, den

die Stadt Stuttgart anlässlich der Sonnenfinsternis am 11. August 1999 veranstaltete.

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 1450 Jugendliche an diesem Programm teilnehmen. Zusätzlich bekamen zehn Schülergruppen, die DESY im Rahmen einer Studienfahrt besichtigten, die Gelegenheit, einen Nachmittag selbst zu experimentieren. Eine Ausweitung des Programms ist in Planung. Das Projekt „physik.begreifen@desy.de“ wurde im Berichtsjahr vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft mit einem Förderpreis für das Jahr 2000 ausgezeichnet.

An besonders interessierte Schülerinnen und Schüler wendet sich die 1998 gegründete Seminarreihe „Faszination Physik“ – ein Treffpunkt und Diskussionsforum für junge Leute zu Themen der modernen Physik. Die Themen werden zusammen mit den Jugendlichen ausgesucht und unter Begleitung eines Physiklehrers dargeboten und diskutiert. Im Berichtsjahr behandelten die Seminare, die jeden Samstag nachmittag stattfinden, zum Beispiel die Frage „Durchbohrt – von einem Schwarzen Mini-Loch“ oder „Zeitreisen in die Zukunft“.