

Bereich Forschung (F)

Inhalt

Übersicht	33
H1-Experiment	37
ZEUS-Experiment	51
HERMES-Experiment	65
HERA-B Experiment	75
Forschung an Lepton Collidern	83
Theoretische Physik	89
Hamburger Synchrotronstrahlungslabor HASYLAB	99
Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie EMBL Außenstation Hamburg	113
Max-Planck-Gesellschaft Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie	119
Elektronik-Entwicklung	125
Bibliothek und Dokumentation	129
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit	133

Übersicht F-Bereich

HERA-Experimente

Der Berichtszeitraum stand ganz im Zeichen des Einlaufens von HERA und der HERA-Detektoren nach dem Umbau zur Luminositätserhöhung. Ein unerwartet hoher Untergrund in den beiden Experimenten H1 und ZEUS machte einen Routinebetrieb von HERA unmöglich. In enger Zusammenarbeit der HERA-Mannschaft mit den Physikern der HERA-Experimente konnten inzwischen die Ursachen im Detail verstanden werden. Die dominante Untergrundquelle ist: Für die Luminositätserhöhung mussten spezielle supraleitende Magnete nahe am Wechselwirkungspunkt in die Detektoren H1 und ZEUS eingebaut werden. In diesen Magneten erzeugen die Elektronen intensive Synchrotronstrahlung. Diese und das Heizen des Strahlrohrs und der Kollimatoren durch die Spiegelladungen der Strahlpakete verschlechtern das Vakuum im Betrieb. Die Wechselwirkungen der Strahlprotonen mit den Restgasatomen führen schließlich zum starken Untergrundsignal. Anders als bei Speicherringen wie LEP oder Tevatron hat HERA sowohl mit der starken Synchrotronstrahlung als auch mit dem hohen Wechselwirkungsquerschnitt von Protonen mit dem Restgas zu kämpfen.

Durch Änderungen an den Kollimatoren und des Vakuumsystems sollen die Probleme in der Zeit März bis Juli 2003 behoben werden. Im September 2003 soll der reguläre HERA-Betrieb wieder aufgenommen werden.

Alle vier HERA-Experimente konnten im Jahr 2002 Daten nehmen: H1 und ZEUS vor allem Testdaten, die zeigen, dass die 2001/02 durchgeführten Detektorverbesserungen erfolgreich waren, HERMES etwa 900 000 tiefunelastische Ereignisse an einem transversal polarisierten Protonentarget und HERA-B 250 000 J/ψ -Ereignisse von Proton-Kohlenstoff und Proton-Wolfram Wechselwirkungen.

Basierend auf den bis 2000 genommenen Daten konnten die vier HERA-Experimente eine größere Anzahl

neuer wissenschaftlicher Ergebnisse vorstellen. Beispiele sind:

- die endgültige Analyse der Daten zur Präzisionsmessung der Protonstrukturfunktion bei hohen Impulsüberträgen und ihrer erfolgreichen Beschreibung im Rahmen der perturbativen Quantenchromodynamik (QCD) höherer Ordnung,
- eine modellabhängige Bestimmung der Pionstrukturfunktion, welche die Universalität der Struktur von Hadronen bei kleinen Partonimpulsen zeigt,
- die erstmalige Bestimmung der Tensorstrukturfunktion des Deuterons,
- die Bestimmung der Wirkungsquerschnitte von B-Teilchen und Charmonium-Zuständen in Proton-Kernwechselwirkungen mit dem HERA-B Experiment,
- die empfindliche Suche nach Effekten jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik mit Grenzen, die vielfach strenger sind als die von anderen Beschleunigern wie LEP und Tevatron.

Neutrino-Astrophysik

Der AMANDA Detektor, der das 3000 Meter dicke Eis des Südpols zum Nachweis hochenergetischer Neutrinos verwendet, konnte auch in diesem Jahr erfolgreich betrieben werden. Mit den in den Jahren 1997–2000 genommenen Daten konnte eine empfindliche Suche nach hochenergetischen Neutrinos, die mit GRBs (Gamma Ray Bursts) korreliert sind, durchgeführt und obere Grenzen bestimmt werden.

Eine ausreichende Empfindlichkeit für hochenergetische Neutrinos der kosmischen Strahlung benötigt allerdings einen Detektor mit einem Volumen von 1 km^3 . Ein entsprechender Vorschlag, IceCube, wurde vorbereitet,

und nach der Genehmigung durch die US-NSF (National Science Foundation) wurde der Vorschlag auch vom DESY-PRC (Physics Research Committee) genehmigt. Die Verantwortung von DESY liegt vor allem bei der Detektoroptimierung, dem Bau von einem Viertel der optischen Module, einem Teil der Ausleseelektronik, der Software-Entwicklung und der physikalischen Analyse.

Entwicklung massiv paralleler Rechner für die Gittereichtheorie

Zur Lösung von Problemen der theoretischen Teilchenphysik mit der Methode der Gittereichtheorie stellt DESY im Rahmen des NIC (John von Neumann Institut für Computing) der Gittereichtheorie-Community 650 GFlops an Rechenleistung zur Verfügung. Die Rechner sind durchgängig überbucht. Eine aktuelle Studie des LATFOR (Forum der deutschen Gittereichtheoretiker) belegt, dass in den nächsten Jahren eine Rechenleistung von etwa 25 TFlops benötigt wird.

Seit 2000 arbeitet DESY mit INFN und Orsay an der Entwicklung des Nachfolgerechners apeNEXT. Ziel ist es, mehr als 10 TFlops Rechenleistung bei Kosten von 1 MFlop/0.5 € zur Verfügung zu stellen. Bei dem Entwurf des Prozessors gab es Verzögerungen. Inzwischen sind der Entwurf und die detaillierte Simulation durchgeführt. Die Entwicklung der Infrastruktur, zum Beispiel der komplexen Platinen und der Überrahmen, ist abgeschlossen.

Vorarbeiten für TESLA

Innerhalb der Gemeinschaft der Hochenergiephysiker besteht inzwischen weltweit Übereinstimmung, dass als nächstes Beschleunigerprojekt der Teilchenphysik ein Elektron-Positron-Linearbeschleuniger (LC) mit einer maximalen Energie von 500–800 GeV benötigt wird. Zu dieser Konsensfindung haben die Arbeiten der FLC-Gruppe ganz wesentlich beigetragen. Die ausgezeichnete Vorbereitung des Projektes wurde vom Wissenschaftsrat, der 2001/02 TESLA begutachtet hat, besonders hervorgehoben.

Die Gruppen FLC in Hamburg und Zeuthen haben in enger Zusammenarbeit mit den DESY Theoriegruppen auch im Jahr 2002 eine führende Rolle bei den Physikstudien innerhalb der ECFA/DESY-Studie gespielt. Schwerpunkte bildeten Untersuchungen auf den Gebieten Higgs-Bosonen, Supersymmetrie, elektroschwache Präzisionsphysik und Physik des Top-Quarks.

Auf dem Gebiet R&D für einen LC-Detektor sind die Untersuchungen zur Kalorimetrie und zur Time Projection Chamber (TPC) in Hamburg sowie zur Kalorimetrie bei kleinen Winkeln und zur Realisierung eines Photon-Photon Colliders in Zeuthen besonders hervorzuheben.

Das DESY PRC ist inzwischen das Gremium, das Europa-weit die Entwicklungsvorschläge für die LC-Experimente begutachtet.

Theorie der Elementarteilchen

In enger Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des II. Instituts für Theoretische Physik der Universität Hamburg und zahlreichen Gästen hat sich die DESY-Theoriegruppe auf folgende Themen konzentriert: Quantenchromodynamik (QCD), Flavour-Physik der schweren Quarks und Neutrinos, Higgs-Mechanismus, Quantengravitation, Zusammenhang von Teilchenphysik und Kosmologie, Stringtheorie, Gittereichtheorie und mathematische Physik.

HASYLAB

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 in der medizinischen Forschung eingesetzt.

2000 Wissenschaftler, ein Viertel davon in der Strukturbiologie, haben im Jahr 2002 das weite Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom sichtbaren Licht

bis zum harten Röntgengebiet genutzt und den Energiebereich von 1 eV bis 300 keV ausgeschöpft. Ihre Ergebnisse sind in 700 Beiträgen zum HASYLAB Jahresbericht 2002 zusammengefasst.

Zusätzlich zum Betrieb der Nutzereinrichtung beteiligt sich HASYLAB an der Ausbildung von Studenten. Auch findet eine enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg, der Außenstelle des EMBL, den Max-Planck-Arbeitsgruppen, der Thetis GmbH sowie mit dem GKSS Forschungszentrum im Bereich der Materialwissenschaften statt.

Im Jahr 2002 ist die Phase 1 der SASE FEL Aktivitäten an der TESLA Test Facility erfolgreich abgeschlossen worden. Auch im Wellenlängenbereich von 80–120 nm konnte Sättigung erreicht werden bei Pulsbrillanzen wie erwartet. Es wurden 10^{13} Photonen in Blitzen von 50 fs Dauer in einem Fokus von 20 μm Durchmesser gemessen. Durch Veränderung der Kompression des Elektronenbunches im TTF1 Linearbeschleuniger konnte die Pulsdauer in einem Bereich zwischen 40 und 100 fs variiert werden, wobei 1 GW Spitzenleistungen bei 100 nm erzielt wurden. Alle experimentellen Beobachtungen sind in voller Übereinstimmung mit der SASE FEL Theorie.

In Phase 1 wurden auch erfolgreiche Ablationsexperimente und Studien von nichtlinearen Effekten in freien Clustern und Atomen am TTF FEL durchgeführt. Die publizierten Ergebnisse haben weltweit großes Interesse erregt, auch bei den Nutzern von optischen Lasern.

Für den TTF2 VUV FEL (Phase 2) wurden insgesamt 30 Projektanträge vorgestellt, und die Anträge wurden von dem erweiterten HASYLAB Project Review Panel für den XUV Spektralbereich begutachtet. An den Anträgen sind fast 200 Wissenschaftler aus 9 Ländern beteiligt. Es wurden Experimente zur Plasmaphysik, zur Forschung an biologischen Proben und zur Untersuchung von Proben in der Gasphase vorgeschlagen. Mehrere Projekte umfassen technische Entwicklungen für die VUV FEL Facility, aber auch Studien an Festkörperproben. Die wissenschaftliche Qualität aller Anträge wurde als exzellent beurteilt. Am DESY wird der TTF2 VUV FEL Strahlung mit Wellenlängen bis zu 6 nm liefern und im Jahr 2004 für Nutzer verfügbar sein.

Die Arbeiten an der Designstudie für den Ausbau des PETRA-Speicherrings in eine erstklassige Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation wurden aufgenommen mit dem Ziel, den Technischen Design Report (TDR) für PETRA III bis zum Ende des Jahres 2003 zu erstellen. Um die Erfordernisse der potenziellen Nutzer zu ermitteln, wurden fünf Workshops organisiert, die von ungefähr 400 Teilnehmern besucht wurden. Die Resonanz der potenziellen Nutzerschaft war sehr erfreulich. Ein erster Vorschlag zum Layout wird im Sommer 2003 vorgestellt und diskutiert werden.

Große Hoffnungen werden auf die Realisierung des TESLA XFEL Labors im Großraum Hamburg bis zum Jahr 2011 gesetzt. Um ihre Bemühungen zu koordinieren, unterzeichneten SLAC und DESY ein „Memorandum of Understanding“ über gemeinschaftliche wissenschaftliche Arbeiten mit dem Ziel, den TESLA-XFEL und das wissenschaftliche Programm der Linear Coherent Light Source (LCLS) zu einem frühen Erfolg zu führen und Forschung zu betreiben, die die einzigartigen Möglichkeiten der neuen Quellen ausschöpft.

Zuvor wurde auf Wunsch des Wissenschaftlichen Rates (WR) eine weitere technische Designstudie (TDR Supplement) erstellt, die die Voraussetzungen für den separaten Bau von XFEL und Linear-Collider im Rahmen des TESLA-Projektes untersucht hat.

Elektronik-Entwicklung

Die Gruppen „Elektronik Entwicklung“ (FE) mit besonderer Expertise auf den Gebieten digitale Datenverarbeitung (FEA), analoge Signalverarbeitung (FEB), Opto- und Mikroelektronik (FEC), spezielle Softwareentwicklungen (FEE) sowie die Service-Gruppe (FEPOS) unterstützen die experimentellen Gruppen der Teilchenphysik, der Forschung mit Synchrotronstrahlung sowie die Maschinengruppen.

Beispiele für die Arbeiten sind der HERMES Silicon Recoil-Detektor, ein Silizium-Driftdetektorsystem, das Gasedektorsystem SAXS, ein aufwändiges Datenerfassungsmodul (RET02) für HASYLAB, Strahlverlustmonitore und der Beam Interlock Concentrator (BIC) für die TESLA Test Facility (TTF2) sowie die Quenchüberwachung der supraleitenden Magnete von HERA.

Bibliothek und Dokumentation

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

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

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

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Der Dialog mit der Öffentlichkeit ist eine Herausforderung, die von DESY gern und mit großem Einsatz angenommen wird. Die Abteilung „Presse- und Öffentlichkeitsarbeit“ (PR) erfüllt hier die Funktion einer „Schnittstelle“ und sorgt für den erforderlichen Informationsfluss. In zunehmendem Maße gewinnt hierbei die Kommunikation des TESLA-Projekts an Bedeutung und fordert verstärkten Einsatz. Eine wichtige Rolle spielte die Information der Anlieger an der TESLA-Trasse im Kreis Pinneberg, wobei ein breites Spektrum abgedeckt werden musste – von den Anfragen einzelner Bürger bis hin zu Informationsveranstaltungen auf Gemeinde- oder Kreisebene.

Internationale Beachtung fanden die Begutachtung des TESLA-Projekts durch den von der Bundesregierung

beauftragten Wissenschaftsrat und die daraus resultierenden Empfehlungen, zu denen Presse- und Informationsmaterial erstellt wurde.

Neben solchen Schwerpunkt-Projekten pflegt die PR-Gruppe ein aktuelles und vielfältiges Spektrum an Informationsangeboten und Kommunikationsmaßnahmen. Informationsbroschüren und Faltblätter wurden ergänzt durch die HERA-Broschüre, die im Berichtsjahr anlässlich „10 Jahre HERA“ fertig gestellt wurde. Einen sehr regen Zuspruch findet auch „DESYs KworkQuark – Teilchenphysik für alle!“, eine hochwertige Lernsoftware, die im Internet für alle frei verfügbar ist.

Ein besonderer Höhepunkt im Berichtsjahr war die Ausstellung „TESLA – Licht der Zukunft“, bei der im Automobil Forum Unter den Linden in Berlin das Zukunftsprojekt TESLA über 22 000 Besuchern, unter ihnen über 70 Schulklassen und 6000 Teilnehmer an der Langen Nacht der Museen, vorgestellt wurde.

Des Weiteren ist die regelmäßige Durchführung von Besichtigungen ein wesentlicher Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit. Im Jahr 2002 kamen etwa 9000 Besucherinnen und Besucher in 393 Einzelgruppen zu DESY, davon 221 Schülergruppen und 50 Studentengruppen.

Das Schülerlabor „physik.begreifen@desy.de“ feierte im November 2002 sein fünfjähriges Bestehen. Die Bilanz kann sich sehen lassen: 440 Gruppen mit insgesamt 8700 Schülerinnen und Schülern nutzten in den vergangenen fünf Jahren das Angebot. Vom Präsidentenfonds der Helmholtz-Gemeinschaft im Berichtsjahr bewilligte Fördermittel ermöglichen es, das Angebot in Hamburg weiter auszubauen und ein entsprechendes Programm auch in Zeuthen zu beginnen. 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.

H1-Experiment

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

Sprecher: E. Elsen, DESY (bis August 2002); M. Klein, DESY (ab August 2002)

Das H1-Experiment ist der Untersuchung der Proton-Struktur sowie der Suche nach neuen Phänomenen in der Streuung von Positronen und Elektronen an Protonen bei höchsten Energien gewidmet. Nach Abschluss der ersten Messphase bei HERA hat die H1-Kollaboration jetzt das Ziel, Messungen mit besonders hoher Präzision in einem durch neue Detektoren und hohe Luminosität erweiterten kinematischen Bereich durchzuführen. Bei der Inbetriebnahme von HERA in der neuen Konfiguration der Wechselwirkungszone stellte sich heraus, dass der durch die Protonen- und Positronenstrahlen induzierte Teilchenuntergrund zu hoch ist, um HERA bei hoher Luminosität betreiben zu können. Deshalb wurden umfangreiche Studien in Zusammenarbeit mit Experten der HERA-Maschine gemacht, durch die das Verständnis für den umgebauten Beschleuniger und die Betriebsbedingungen des H1-Detektors wesentlich vertieft wurde.

Im Lauf des Jahres 2002 wurden alle neuen Detektorkomponenten in Betrieb genommen und Daten aufgezeichnet, die der Eichung der Detektoren, der Programmentwicklung und der physikalischen Analyse dienen. Der Detektor wurde durch neue Spurdetektoren zur Messung von geladenen Teilchen, die nach vorn, das heißt in Protonenstrahlrichtung erzeugt werden, erheblich verbessert. Abbildung 3 zeigt den neuen Siliziumdetektor (FST), der in Verbindung mit den neuen Vorwärtsspur-

kammern eine wesentliche Rolle bei der Messung von Mesonen mit schweren Quarks und dem Nachweis stark gestreuter Elektronen spielt. Abbildung 4 zeigt Spuren geladener Teilchen im FST.

Wichtige Vorarbeiten wurden für die vorgesehene Unterbrechung des Beschleunigerbetriebes im Frühjahr 2003 geleistet. Neben verschiedenen Verbesserungen an der Apparatur wird in dieser Zeit die Akzeptanz für diffraktive Prozesse durch einen neuen Detektor vergrößert werden, der in 220 m Abstand vom H1-Detektor in Protonenstrahlrichtung installiert wird. Darüber hinaus wird ein neuartiges Polarimeter installiert, das eine zusätzliche sehr präzise Bestimmung der longitudinalen Polarisation des Elektronen- bzw. Positronenstrahls ermöglichen wird.

Mehrere Veröffentlichungen des Jahres 2002 befassten sich mit Reaktionen der tiefunelastischen Streuung. Sie wurden mit Rechnungen verglichen, die auf der Theorie der starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik (QCD), beruhen. Dies betraf die Erzeugung von hadronischen Jets und von Vektormesonen sowie die Suche nach speziellen Phänomenen, den so genannten Odderon- und Instanton-induzierten Prozessen. Einige Arbeiten befassten sich mit der unelastischen Erzeugung von J/ψ -Teilchen, die mit der am Fermilab (USA) untersuchten Proton-Antiproton-Streuung verglichen werden

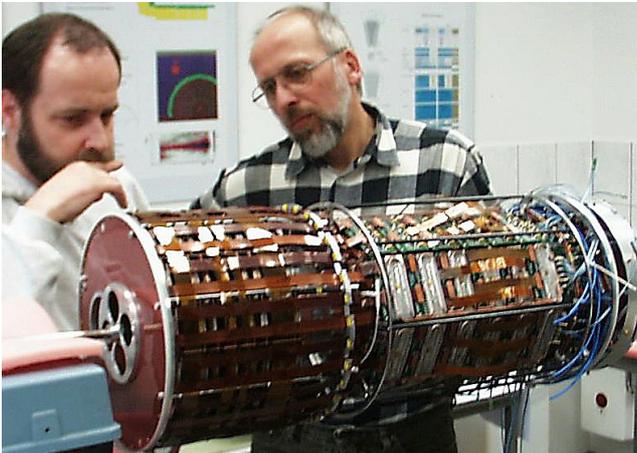


Abbildung 3: Der FST vor dem Einbau in den H1-Detektor mit seinen drei Teilen: einem Siliziumstreifen-detektor mit 7 Detektorebenen (links), der Taktverteiler- und Signaltreiberelektronik (Mitte) sowie dem Kontakt-ring (rechts) zum Anschluss der Signal- und Kühlwasserleitungen.

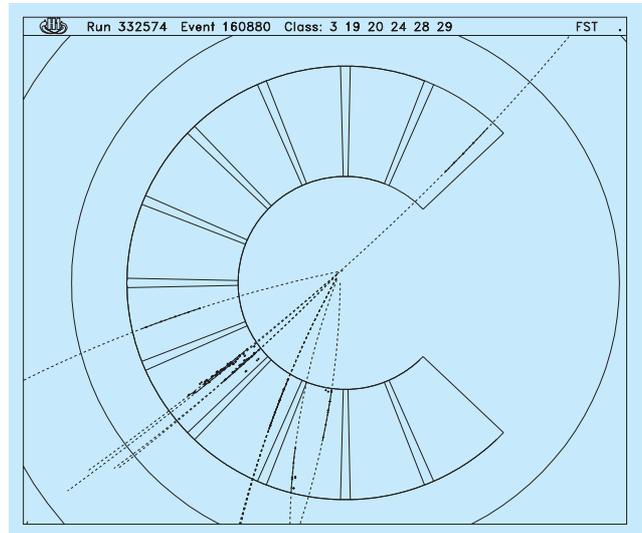


Abbildung 4: Darstellung der Signale von Spuren geladener Teilchen, die im neuen Vorwärts-Siliziumstreifendetektor (FST) des H1-Experiments rekonstruiert wurden.

kann und interessante Tests von QCD-Rechnungen erlaubt. Einen weiteren Schwerpunkt im Berichtsjahr stellten der Nachweis von Ereignissen mit einem isolierten Lepton und fehlendem Transversalimpuls sowie die Suche nach angeregten Elektronen dar.

Mit der Aussicht auf hohe Luminosität und longitudinal polarisierte Positronen- und Elektronenstrahlen steht dem H1-Experiment eine interessante Zukunft bevor.

Der H1-Detektor

Die mit dem neuen H1 Luminositätsmonitor von Mitte April 2002 bis Ende Februar 2003 registrierte Luminosität betrug gut 12 pb^{-1} ; davon konnten allerdings nur knapp 3 pb^{-1} mit voller Hochspannung in den zentralen Driftkammern aufgenommen werden.

Mit allen neuen Detektorkomponenten konnten erste Erfahrungen im Strahlbetrieb gemacht werden. Für den Siliziumspurdetektor in Vorwärtsrichtung beträgt die Signalamplitude das 32-fache des thermischen Rauschens – ein sehr guter Wert. Die Messgenauigkeit wurde zu $12 \mu\text{m}$ bestimmt. Im nachfolgenden Vorwärts-spurdetektor werden geladene Teilchen in nun 14 plana-

ren Driftkammern in 5 Orientierungen nachgewiesen. Eine vereinheitlichte Überwachung und Steuerung der Hochspannung aller Drift- und Proportionalkammern, basierend auf kommerzieller Software, wurde erfolgreich eingeführt und hat den Schichtbetrieb vereinfacht. In der Datennahme konnte der Untergrund durch Verwendung von Flugzeitinformation im Rückwärtskalorimeter SpaCal auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Eine Verbesserung ist von der Bestimmung des Kollisionsorts mit der neuen inneren Proportionalkammer zu erwarten. Allerdings ist hier die Elektronik durch Überhitzung geschädigt worden. Es konnten jedoch mit zwei aus fünf Lagen korrekte Triggersignale geliefert werden. Die zentrale Driftkammer ist in optimalem Zustand, was unter anderem durch die Beobachtung von Teilchen mit Strangeness und Charm mit der erwarteten Massenauflösung belegt wurde. Die SpaCal- und Flüssig-Argon-Kalorimeter, zentrale Komponenten des H1-Detektors, lieferten zuverlässig Daten zur Analyse von tiefunelastischen Ereignissen und zum Verständnis des Strahluntergrunds.

Die noch ausstehenden Erweiterungsprojekte sind energisch fortgeführt worden. Für den schnellen Spurtrigger, der Signale der zentralen Driftkammer verwendet, sind alle Elektronikkomponenten installiert und erste Tests erfolgreich durchgeführt worden. Die Er-

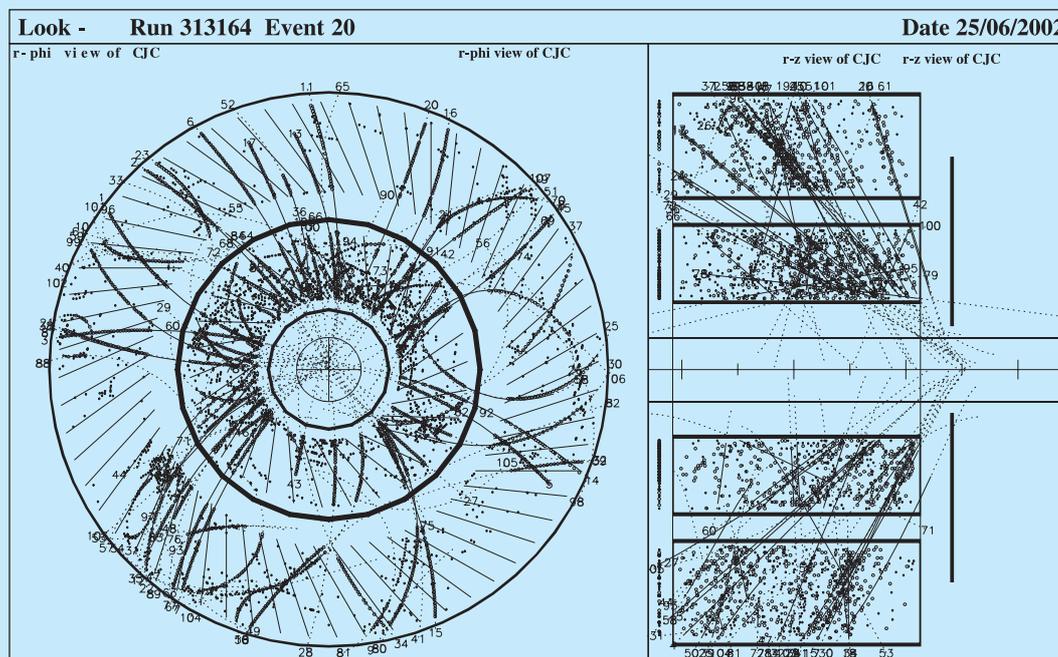


Abbildung 5: Ein typisches Proton-induziertes Untergrundereignis in der zentralen Spurkammer von H1. Aus der Seitenansicht (rechts) wird deutlich, dass es sich um eine Wechselwirkung mit einer Synchrotronstrahlungsblende im rückwärtigen Teil des Strahlrohrs handelt.

weiterung des Vorwärts-Protonenspektrometers bis 220 m vom Kollisionspunkt mit Faserdetektoren in beweglichen Ansätzen am Strahlrohr und einer 9 m langen Umleitung für die Heliumleitungen ist bereit zum Einbau.

Anfang März 2003 wurde der Strahlbetrieb für gut vier Monate unterbrochen, um weitere Maßnahmen zur Reduktion des Untergrundes, unter anderem Einbau einer Ionengetterpumpe innerhalb von H1, sowie Reparaturen am Detektor, unter anderem Austausch der Elektronik an der inneren Proportionalkammer und Verbesserung der Kühlung, durchzuführen.

Detektorbetrieb bei HERA II

Bereits zu Beginn des Jahres 2002 wurde deutlich, dass Strahlströme von wenigen mA zu unakzeptabel hohen Untergrundraten in den Siliziumdetektoren und den empfindlichen Drahtkammern führen. Eine vertikale

Aperturbegrenzung auf der rückwärtigen Seite des Detektors wurde als Quelle für zurückgestreute Synchrotronstrahlung identifiziert und in einer Betriebspause im März beseitigt. Nach dieser Modifikation ergaben detaillierte Messungen des durch Synchrotronstrahlung bedingten Untergrundes, dass der nach sorgfältiger Optimierung der Strahlage verbleibende Untergrund in guter Übereinstimmung mit den Simulationsrechnungen war. Bei erhöhter Positronenstrahl-Intensität zeigte sich, dass der Untergrund nichtlinear vom Strahlstrom abhängt. Dieses Verhalten ließ sich auf Wechselwirkungen des Positronenstrahls mit dem Restgas im Strahlrohr zurückführen unter der Annahme, dass das Strahlvakuum durch den Positronenstrahl verschlechtert wird. Eine solche Verschlechterung des Vakuums wird wegen der auftretenden Desorption von Gasmolekülen von den Wänden des Strahlrohrs erwartet, die durch Synchrotronstrahlung und lokale Erwärmung durch elektromagnetische Verluste des Positronenstrahls, insbesondere während der Injektion bei einer Energie von 12 GeV, hervorgerufen wird.

Extrapolationen zu den angestrebten Sollwerten von 105 mA Protonenstrom und 55 mA Positronenstrom ergeben jedoch, dass der weitaus größte Beitrag zum Untergrund im H1-Detektor von Protonenstrahl-induzierten Wechselwirkungen mit dem Restgas im Strahlrohr zu erwarten ist. Bei unveränderten Bedingungen würde der zu erwartende Kammerstrom den tolerierbaren Wert um ein Vielfaches übersteigen. Eingehende Vergleiche von Messergebnissen mit detaillierten Monte Carlo-Simulationen im Bereich von ± 60 m um den Wechselwirkungspunkt erklären Ereignisse wie das in Abbildung 5 gezeigte folgendermaßen: Bei dem zweistufigen Prozess eines vom Protonenstrahl herführenden Untergrundereignisses geht zuerst ein Proton vor Erreichen des H1-Detektors eine Wechselwirkung mit einem Restgasatom ein. Eines der zahlreichen bei einer solchen Kollision entstehenden Sekundärteilchen trifft in einem zweiten Schritt innerhalb des H1-Detektors auf das Strahlrohr oder eine der in dem Strahlrohr befindlichen Blenden und löst einen weiteren Schauer aus, der viele Spuren im Detektor hinterlässt. Die Rate solcher Ereignisse hängt, wie im zuvor diskutierten Fall, vom Strahlvakuum und damit auch von der Positronenstrahl-Intensität ab.

Als eines der wesentlichen Ziele auf dem Weg zum Erreichen der Soll-Luminosität von HERA II muss daher eine signifikante Verbesserung des Strahlrohrvakuums in und um die Wechselwirkungszone angesehen werden. In enger Zusammenarbeit mit Experten der Beschleunigergruppe und der anderen HERA-Experimente wurden zahlreiche Testmessungen durchgeführt, um den Mechanismus der dynamischen Vakuumverschlechterung zu untersuchen. Ebenso wurde untersucht, ob Änderungen des Detektors, wie zum Beispiel eine modifizierte Abschirmung, eine veränderte Betriebstemperatur der neuen supraleitenden Strahlführungselemente innerhalb des Detektors oder lokal erhöhte Pumpleistungen, eine signifikante Verbesserung erwarten lassen.

Abbildung 6 zeigt anhand des zeitlichen Verlaufs des Vakuumrohrdrucks in der Wechselwirkungszone, bestimmt aus der im Luminositätsmonitor gemessenen Rate von Positron-Gas-Wechselwirkungen, dass im Laufe des Jahres deutliche Verbesserungen des Strahlrohrvakuums eingetreten sind. Durchaus vergleichbare Verbesserungen des Vakuums innerhalb von Monaten beobachtete man auch als Folge der Betriebsunter-

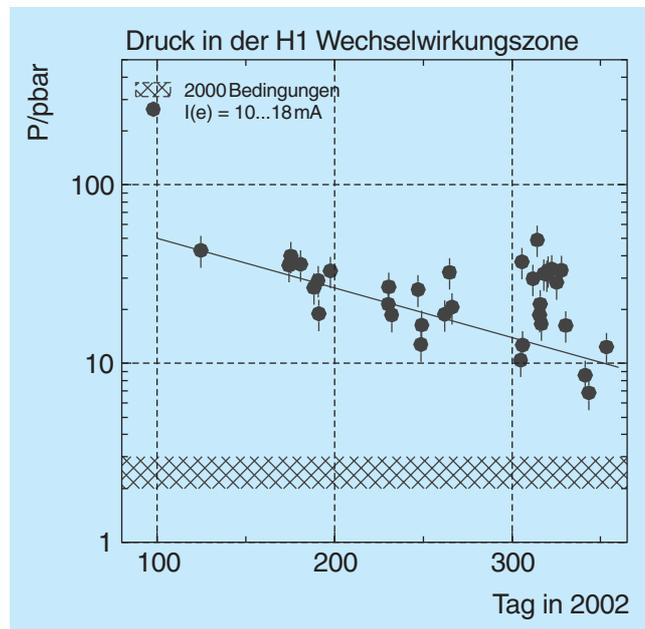


Abbildung 6: Der Druck im Vakuumrohr des H1-Detektors, gemessen im Luminositätsmonitor über die Positron-Gas-Wechselwirkungsrate, nahm im Verlauf des Jahres 2002 ab. Die um den Tag 310 beobachtete Erhöhung des Drucks ist eine Folge der zu Testzwecken erhöhten Temperatur des Hitzeschildes der supraleitenden Strahlführungsmagnete in der Nähe der Wechselwirkungszone.

brechung 1994/95. Wie Abbildung 6 jedoch auch zeigt, ist nun noch ein wesentlicher Schritt erforderlich, um vergleichbare Werte wie im Jahre 2000 zu erreichen.

Physikalische Ergebnisse

Das Schwergewicht der Aktivitäten lag, abgesehen von der Inbetriebnahme des Detektors und der Optimierung des Strahlbetriebs, in der Auswertung der zahlreichen Messdaten von HERA I. Im Folgenden werden wichtige, im Berichtsjahr abgeschlossene Analysen etwas näher erläutert.

Jets, Instantonen und QCD

Eine der Hauptaufgaben ist die kritische Überprüfung der Theorie der starken Wechselwirkung, der Quan-

tenchromodynamik (QCD), in den durch HERA neu erschlossenen Bereichen des Phasenraumes. Bei der Kollision von Positronen und Protonen stößt das vom Lepton emittierte virtuelle Photon ein Quark aus dem Proton heraus, das mit den im Proton eingeschlossenen Quarks und Gluonen zunächst noch durch die Farbkraft verbunden ist. Entlang der Verbindung werden aus dem Vakuum neue Quark-Antiquark-Paare gebildet. Die Quarks strahlen Gluonen ab, die wiederum in Quark-Antiquark-Paare fluktuieren. Die Ausbildung solcher Teilchen-Kaskaden wird mit Hilfe der QCD untersucht. Bei den hohen Energien bei HERA erscheinen die nach diesem komplizierten Muster erzeugten Quarks und Gluonen oft als ausgeprägte Teilchenbündel, so genannte Jets. Durch die Messung von Jets erhält man ein Bild von der ursprünglichen Quark-Gluon-Kaskade, das mit der Theorie verglichen werden kann.

Im Berichtsjahr wurde eine Studie zur inklusiven Jet-Erzeugung in tiefunelastischer Streuung veröffentlicht. Die Messung wurde bei quadrierten Impulsüberträgen Q^2 vom Positron auf das Proton im Bereich von $5 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$ durchgeführt und ist eine Fortsetzung früherer Studien bei größerem Q^2 . Die Jet-Erzeugung wurde in Abhängigkeit von Q^2 , von E_T , der transversalen Energie der Jets, und η , der Pseudorapidität der Jets, gemessen. Die Variable η ist ein Maß für den Erzeugungswinkel der Jets relativ zur Strahlrichtung, wobei negative Werte von η der rückwärtigen Hemisphäre (Seite des auslaufenden Elektronenstrahls) und positive Werte der Seite des auslaufenden Protonenstrahls entsprechen. Abbildung 7 zeigt die gemessenen Wirkungsquerschnitte für Jet-Erzeugung als Funktion von E_T in drei verschiedenen Bereichen von η . Die Daten werden mit QCD-Störungsrechnungen in führender (LO) und nächst höherer Ordnung (NLO) der starken Kopplungskonstanten α_s verglichen, wobei die Unsicherheit der NLO-Rechnung als Fehlerband dargestellt ist. Die relative Differenz zwischen Daten und QCD-Rechnung ist zur Verdeutlichung in linearer Skala im unteren Teil der Abbildung aufgetragen.

Die QCD-Rechnungen stimmen mit den Messergebnissen gut überein, mit Ausnahme der Vorwärtsrichtung bei kleinen E_T , wo die Übereinstimmung mit den Messergebnissen nur mäßig ist. Eine genauere Inspektion zeigt, dass diese Abweichungen durch Streuereignisse bei kleinen $Q^2 < 20 \text{ GeV}^2$ verursacht werden. Dabei ist

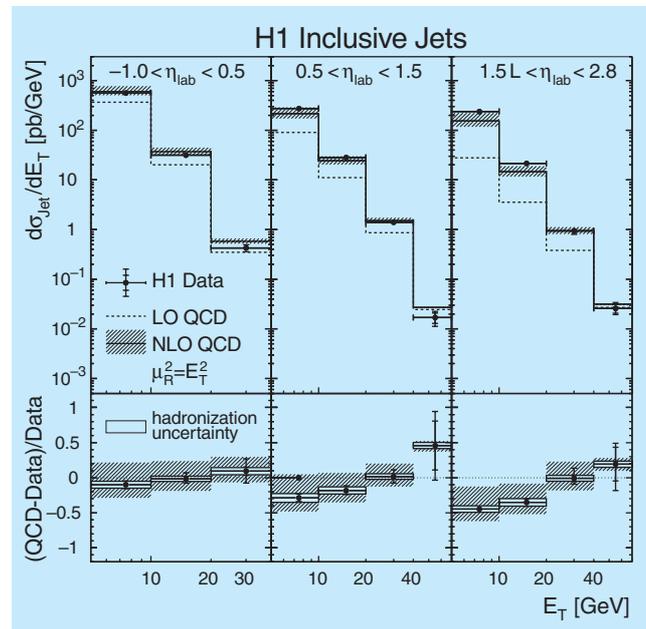


Abbildung 7: Wirkungsquerschnitte für die Elektroproduktion von Teilchen-Jets als Funktion der Transversalenergie E_T für drei Winkelbereiche (η_{lab}) der Jets. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) sind verglichen mit Vorhersagen der Theorie der starken Wechselwirkung (QCD), gerechnet in führender (LO) und nächst höherer (NLO) Ordnung. Der untere Bereich der Figur zeigt die relativen Abweichungen zwischen Daten und QCD-Erwartung. Abgesehen vom Bereich kleiner E_T -Werte in Vorwärtsrichtung ($1.5 < \eta_{\text{lab}} < 2.8$) werden die Daten im Rahmen der Unsicherheit der Erwartung gut durch NLO QCD beschrieben.

bemerkenswert, dass die Beschreibung der Daten durch die in diesem Bereich sehr großen NLO-Korrekturen von etwa einem Faktor drei schon erheblich verbessert wurde, was die Vermutung nahelegt, dass Beiträge der nächst höheren Ordnung (NNLO QCD) nicht zu vernachlässigen sind. Solche Berechnungen liegen aber noch nicht vor.

Es handelt sich bei den QCD-Rechnungen um die sogenannte DGLAP-Approximation der Evolution der Quark-Gluon-Kaskade. Diese Approximation erlaubt somit eine gute Beschreibung der Jet-Erzeugung, mit Ausnahme der Vorwärtsrichtung bei niedrigen Transversalenergien der Jets. Künftige QCD-Rechnungen in NNLO könnten zeigen, ob die DGLAP-Evolution

auch hier zur Beschreibung genügt, oder ob andere Modelle der Evolution, zum Beispiel die so genannte BFKL-Evolution, besser geeignet sind.

In nicht-Abelschen Eichtheorien, insbesondere der QCD, können komplexe topologische Strukturen des Vakuums auftreten. Als Instantonen werden Tunnelprozesse von einem Vakuumzustand in einen anderen, der zwar energetisch äquivalent, aber topologisch verschieden ist, bezeichnet. Diese im Rahmen des Standardmodells erwarteten, nicht perturbativen Prozesse sind experimentell noch nicht nachgewiesen worden. Es wird jedoch vorausgesagt, dass ein sehr kleiner Teil der bei HERA beobachteten ep-Ereignisse auf Instanton-Prozessen beruht. Bei diesen Prozessen wird eine große Anzahl von Hadronen im Endzustand erwartet, die aus einer feuerballartigen Erzeugung von Quarks aller Arten stammen. Eine Entdeckung dieser Prozesse wäre eine neuartige Manifestation der Struktur nicht-Abelscher Eichtheorien.

Die H1-Kollaboration hat etwa 375 000 tiefunelastische ep-Streuereignisse mit $Q^2 > 2 \text{ GeV}^2$ auf für Instanton-induzierte Prozesse typische Signaturen hin untersucht und fand 410 Ereignisse, also etwa ein Tausendstel der Ereignisse, welche die gewählten Bedingungen erfüllten. Bei der detaillierten Simulation gewöhnlicher Streuereignisse ohne Instanton-Prozesse erfüllt jedoch eine ähnliche, wenn auch etwas kleinere Zahl von Ereignissen die Kriterien. Die Unsicherheiten der Messung und der Simulation des hadronischen Endzustandes erlauben bisher nicht, aus einem kleinen Überschuss in einem speziellen Phasenraumgebiet auf Instanton-induzierte Prozesse zu schließen.

Es können jedoch obere Grenzen für die Wirkungsquerschnitte mit Instanton-induzierten Prozessen angegeben werden. Die konservativste Grenze unter der Annahme, dass die selektierten Ereignisse keinen Anteil an Standard-Ereignissen haben, liegt um einen Faktor fünf über der theoretischen Erwartung. Diese erste Untersuchung schließt daher zwar sehr große Instanton-Beiträge bei HERA aus, kann aber die theoretische Erwartung weder bestätigen noch widerlegen. Es bleibt zukünftigen Untersuchungen vorbehalten, mit höheren Ereignisraten bei großen Impulsüberträgen und mit weiterem Fortschritt im theoretischen Verständnis der Hadron-Erzeugungsprozesse, eine den erwarteten Instanton-Wirkungsquerschnitten entsprechende Empfindlichkeit zu erreichen.

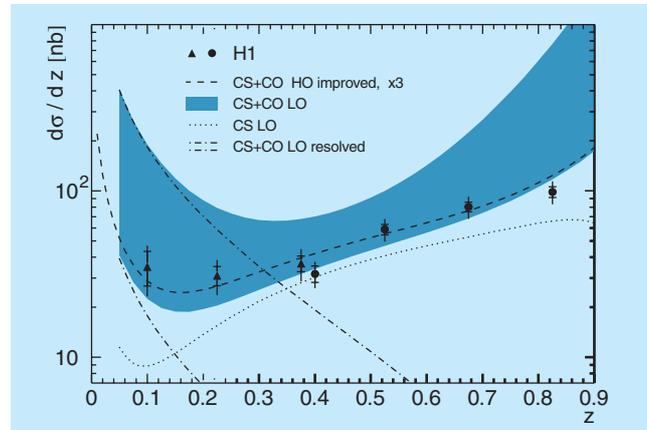


Abbildung 8: Wirkungsquerschnitt für die unelastische Photoproduktion von J/ψ -Mesonen als Funktion der Elastizität z (Energie des J/ψ -Mesons relativ zur Photon-Energie). Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) liegen oberhalb der Erwartung des „Colour Singlet“-Modells (CS LO, gepunktete Kurve), sind jedoch gut vereinbar mit Voraussagen, die auch „Colour Octet“-Beiträge beinhalten (CS+CO LO, dunkles Band).

Unelastische Charmonium-Produktion

Zwei Veröffentlichungen berichten über die unelastische Produktion von J/ψ -Mesonen durch Positron-Proton-Kollisionen in einem im Vergleich zu früheren Messungen erheblich erweiterten kinematischen Bereich. Messungen der Wirkungsquerschnitte sind von großem Interesse, da sie Vergleiche mit aktuellen QCD-Rechnungen erlauben und somit zu einem besseren Verständnis für den Mechanismus der Erzeugung von schweren Quarks beitragen. Hierbei geht es vor allem um die Frage der Farbübertragung. Das J/ψ -Meson ist, wie alle Hadronen, farbneutral (man spricht von „Colour Singlet“ (CS) Zuständen), das c -Quark und c -Antiquark, aus welchen das J/ψ -Meson aufgebaut ist, entstehen aber aus einem farbigen Gluon, das kurzfristig in ein Quark-Antiquark-Paar fluktuiert. Wo bleibt die Farbladung? Zwei verschiedene Modelle versuchen dies zu erklären:

- In dem „Colour Singlet“ Modell strahlt eines der Quarks ein Gluon ab, wodurch Farbe übertragen, jedoch der Endimpuls des J/ψ -Mesons merkbar beeinträchtigt wird.

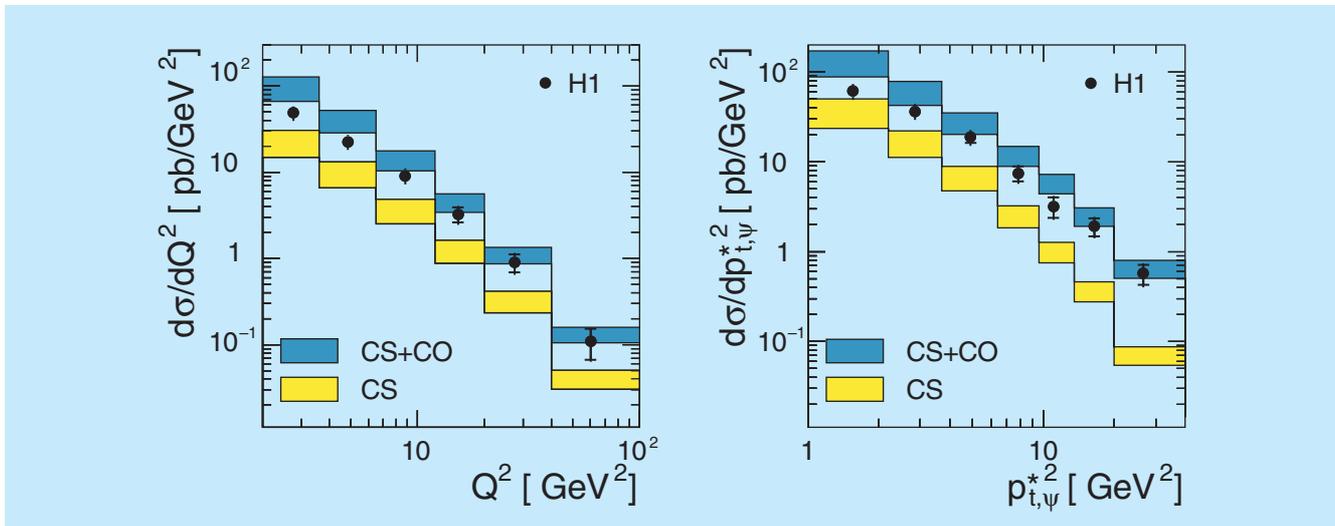


Abbildung 9: Wirkungsquerschnitte für die unelastische Elektroproduktion von J/ψ -Mesonen als Funktion des quadrierten Impulsübertrages Q^2 und des quadrierten Transversalimpulses $p_{t,\psi}^{*2}$ des J/ψ -Mesons. Die gemessenen Verteilungen (Punkte mit Fehlerbalken) werden recht gut durch Modellrechnungen beschrieben, die sowohl „Colour Singlet“- (CS) als auch „Colour Octet“-Beiträge (CS+CO) enthalten, wohingegen die Daten reine CS-Beiträge ausschließen.

- In dem „Nicht-relativistischen QCD-Modell“ (NRQCD) werden Quark-Antiquark-Paare sowohl als farbneutrale „Colour-Singlet“ als auch als farbige „Colour Octet“ (CO) Zustände erzeugt. Die Farbladung wird hier durch Abstrahlung von sehr weichen Gluonen weggetragen, welche in erster Näherung den Impulszustand des J/ψ -Mesons nicht verändern. Der relative Anteil von CO-Zuständen wird im Modell nicht vorausgesagt und muss durch Vergleich mit Messdaten angepasst werden.

Das NRQCD-Modell konnte die am Fermilab in Proton-Antiproton-Kollisionen beobachtete J/ψ -Erzeugung erfolgreich durch einen Beitrag von CO-Zuständen erklären.

Die H1-Daten zur unelastischen J/ψ -Erzeugung umfassen den Q^2 -Bereich $0 < Q^2 < 100$ GeV², das heißt sowohl Photoproduktion als auch tiefunelastische Streuung. Die Wirkungsquerschnitte konnten differenziell in mehreren Variablen bestimmt werden. Einige Photoproduktions-Resultate werden in Abbildung 8 gezeigt, wo die Wirkungsquerschnitte als Funktion der Elastizität z , des relativen Anteils des J/ψ -

Mesons an der gesamten übertragenen Energie des Photons, aufgetragen sind und mit den erwähnten QCD-Modellrechnungen verglichen werden. Man sieht, dass die gepunktete Kurve (CS) unter den Daten liegt. Das Band repräsentiert die NRQCD-Rechnung unter Annahme eines CO-Anteils, wie er aus den Fermilab-Daten bestimmt worden ist. Die Fermilab-Daten zur inklusiven J/ψ -Erzeugung erscheinen daher mit den H1-Daten verträglich.

Abbildung 9 zeigt, dass die Abhängigkeit des gemessenen Wirkungsquerschnitts von anderen Größen durch die NRQCD-Rechnungen ebenfalls befriedigend beschrieben wird. Einzige Ausnahme sind die z -Verteilungen bei höheren Werten von Q^2 , wo signifikante, noch nicht verstandene Abweichungen von den Daten beobachtet werden (Abb. 10).

Insgesamt lässt sich sagen, dass die vorgelegten Messergebnisse interessante Vergleiche mit QCD-Rechnungen erlauben. So erscheint es möglich, die H1-Daten im Rahmen der NRQCD-Rechnungen zu beschreiben, obwohl auch klar ist, dass weitere Rechnungen zu Einflüssen höherer Ordnung erforderlich sind.

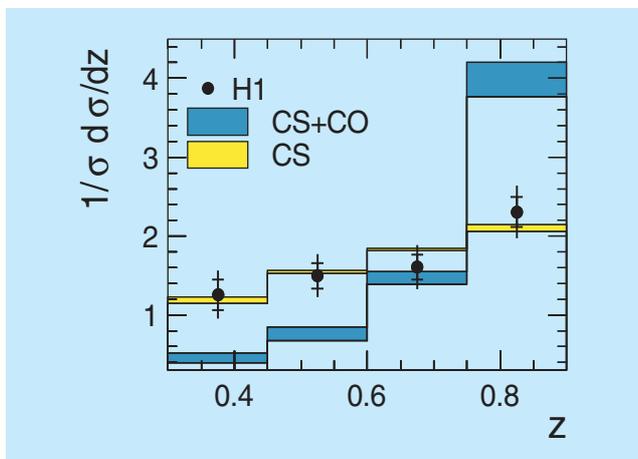


Abbildung 10: Wirkungsquerschnitte für die unelastische Elektroproduktion von J/ψ -Mesonen als Funktion der Elastizität z , des relativen Anteils des J/ψ -Mesons an der gesamten übertragenen Energie des Elektrons. Die gemessene Verteilung (Punkte mit Fehlerbalken) weicht deutlich von der NRQCD-Modellrechnung ab, die sowohl „Colour Singlet“- (CS) als auch „Colour Octet“-Beiträge (CS+CO) enthält. Dagegen werden die Daten durch reine CS-Beiträge gut beschrieben.

Diese Messungen tragen so zum Verständnis der Erzeugung gebundener Zustände schwerer Quarks in ep - und $p\bar{p}$ -Wechselwirkungen bei.

Diffraktive Prozesse

Einen wichtigen Bereich der Untersuchungen zur starken Wechselwirkung bei HERA bilden so genannte diffraktive Prozesse. Bei diesen Ereignissen, die in der tiefunelastischen Streuung etwa 10% des Gesamtwirkungsquerschnittes ausmachen, verliert das Proton nur einen kleinen Teil seiner Energie und bleibt entweder intakt oder dissoziiert in ein System kleiner Masse mit Proton-Quantenzahlen. Man spricht hier auch vom Pomeron-Austausch. Experimentelle Signatur solcher Ereignisse ist eine große Lücke in der Winkelverteilung des hadronischen Endzustandes in Richtung des Protonenstrahls, da in dem Prozess nur Vakuum-Quantenzahlen ausgetauscht werden. Als eine andere Signatur der diffraktiven Streuung dient für einen Teil der Ereignisse der direkte Nachweis des gestreuten, intakten Protons in den „Roman Pot“ Spektrometern,

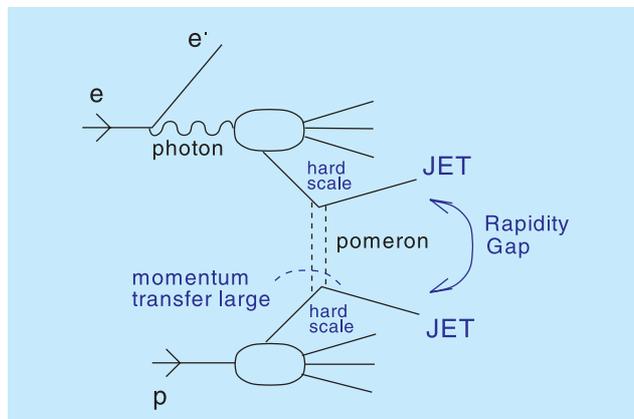


Abbildung 11: Diagrammatische Darstellung der Zwei-Jet-Erzeugung in ep -Streuung mit Rapiditäts-lücke zwischen den Jets.

die etwa 100 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt installiert sind.

Besonders interessant ist die Analyse diffraktiver Prozesse in der unelastischen Streuung oder in Ereignissen mit hohen Transversalimpulsen. Diese machen es möglich, die Struktur des diffraktiven Austausches im Rahmen der perturbativen QCD theoretisch zu beschreiben, zum Beispiel durch Zwei-Gluon-Austausch, im Gegensatz zur „weichen“ Diffraction.

Im Berichtsjahr wurden von der H1-Kollaboration mehrere Arbeiten über diffraktive Prozesse veröffentlicht. In einer dieser Arbeiten wurden Ereignisse mit zwei hochenergetischen Teilchen-Jets im hadronischen Endzustand selektiert und nach Anzeichen von diffraktivem Austausch zwischen den Jets gesucht. Wie in Abbildung 11 skizziert, können die Jets in einem „harten“ Streuprozess zweier Quarks erzeugt werden, wobei ein Quark aus dem virtuellen Photon und eines aus dem Proton stammt. In diesem Fall entsteht eine Rapiditätslücke zwischen den Jets durch Austausch eines farbneutralen Pomerons zwischen den beiden Quarks. Solche Prozesse sind besonders interessant, weil durch die hohe Energie bzw. den hohen Transversalimpuls der Jets eine „harte Skala“ gegeben ist, die Störungsrechnungen in der QCD erlaubt.

In Abbildung 12 ist der Wirkungsquerschnitt für Zwei-Jet-Erzeugung als Funktion der Transversalenergie E_T^{gap} aufgetragen, die in der Rapiditätslücke zwischen den Jets gemessen wird. Die Daten liegen bei kleinen E_T^{gap}

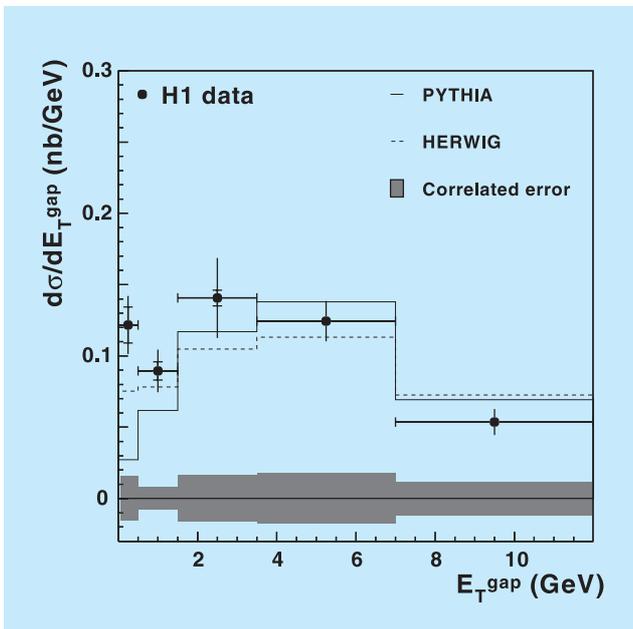


Abbildung 12: Wirkungsquerschnitt der Zwei-Jet-Erzeugung in Abhängigkeit von der deponierten Transversalenergie E_T^{gap} zwischen den Jets mit den jeweiligen höchsten Transversalenergien E_T . Das Band zeigt die Größe der systematischen Fehler. Bei niedrigen Werten von E_T^{gap} liegen die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) deutlich über den Modellrechnungen (durchgezogenes und gepunktetes Histogramm). Dies ist ein Hinweis auf den Austausch eines farbneutralen Objektes (Pomeron), ein Prozess, der nicht in den Modellrechnungen enthalten ist.

deutlich über den beiden in Abbildung 12 gezeigten Simulationsrechnungen, das heißt es gibt mehr Ereignisse mit ausgeprägten Rapiditätslücken als nach diesen Standardrechnungen erwartet wird. Dies ist ein Hinweis auf den Austausch eines farbneutralen Objektes, der in den Simulationsrechnungen nicht enthalten ist.

Der relative Anteil von etwa 10% solcher Ereignisse mit ausgeprägten Rapiditätslücken zwischen den Jets stimmt gut mit einem ähnlichen Ergebnis der ZEUS-Kollaboration überein. Das Ergebnis kann interessanterweise auch mit Resultaten aus der Proton-Antiproton-Streuung am Fermilab verglichen werden, wo ähnliche Ereignisse beobachtet wurden, und stellt einen weiteren Schritt zum Verständnis des Austauschs farbneutralen Objekte im Rahmen der QCD dar.

Auch die Studien von diffraktiven Prozessen mit exklusiven Endzuständen wurden in mehreren Veröffentlichungen fortgesetzt. Eine dieser Studien befasst sich mit der Elektroproduktion von ρ^0 -Mesonen, $ep \rightarrow e\rho^0 Y$, wobei Y entweder das intakte, gestreute Proton darstellt oder das dissoziierte System bezeichnet, in welches das Proton übergeht. Das gestreute Positron wurde im rückwärtigen SpaCal-Kalorimeter beobachtet, das heißt der Prozess fand bei mittleren quadrierten Impulsüberträgen statt, $2.5 < Q^2 < 60 \text{ GeV}^2$. Das ρ^0 -Meson wurde in der zentralen Jetkammer anhand der beiden geladenen Zerfalls-Pionen ($\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$) nachgewiesen. Der gemessene Bereich von quadrierten Impulsüberträgen t' vom Proton auf das System Y wurde im Vergleich zu früheren Studien erheblich erweitert ($0 < t' < 3 \text{ GeV}^2$). In der Analyse wurde die Spinübertragung vom virtuellen Photon auf das ρ^0 -Meson als Funktion von t' untersucht. Einige Resultate dieser Messung sind in Abbildung 13 dargestellt, in welcher so genannte Dichtematrix-Elemente als Funktion von t' aufgetragen sind.

Die herkömmliche Erwartung, dass die Helizität (Spin-Ausrichtung) des Photons bei der Streuung auf das erzeugte ρ^0 -Meson übergeht (s-Channel Helicity Conservation – SCHC) wird von den Daten nicht bestätigt. Die Abweichungen von SCHC werden mit steigenden Werten von t' immer größer. In neueren QCD-Störungsrechnungen, die in Abbildung 13 als Kurven dargestellt sind, wird diese SCHC-Verletzung aber erwartet und in einer Höhe vorausgesagt, die gut mit den jetzt gemessenen Daten übereinstimmt. In den dargestellten Modellrechnungen wird die Streuung des Photons am Proton durch Austausch von zwei Gluonen beschrieben. Das Photon befindet sich kurzfristig während der Streuung in einem Quark-Antiquark-Zustand, der in das ρ^0 -Meson übergeht. Die Helizitätsänderung, die eine Übertragung von Drehimpuls vom Proton auf das ρ^0 -Meson impliziert, erfordert im Modell eine asymmetrische Verteilung des Photon-Impulses auf das Quark und das Antiquark, die das ρ^0 -Meson bilden. Mit diesen Messungen konnten erstaunlich detaillierte Vorhersagen durch QCD-Rechnungen für eine Einzelreaktion bestätigt werden.

Im Rahmen der QCD kann das Pomeron als Kombination von zwei Gluonen beschrieben werden, die das einfachste System darstellt, das die Quantenzahlen

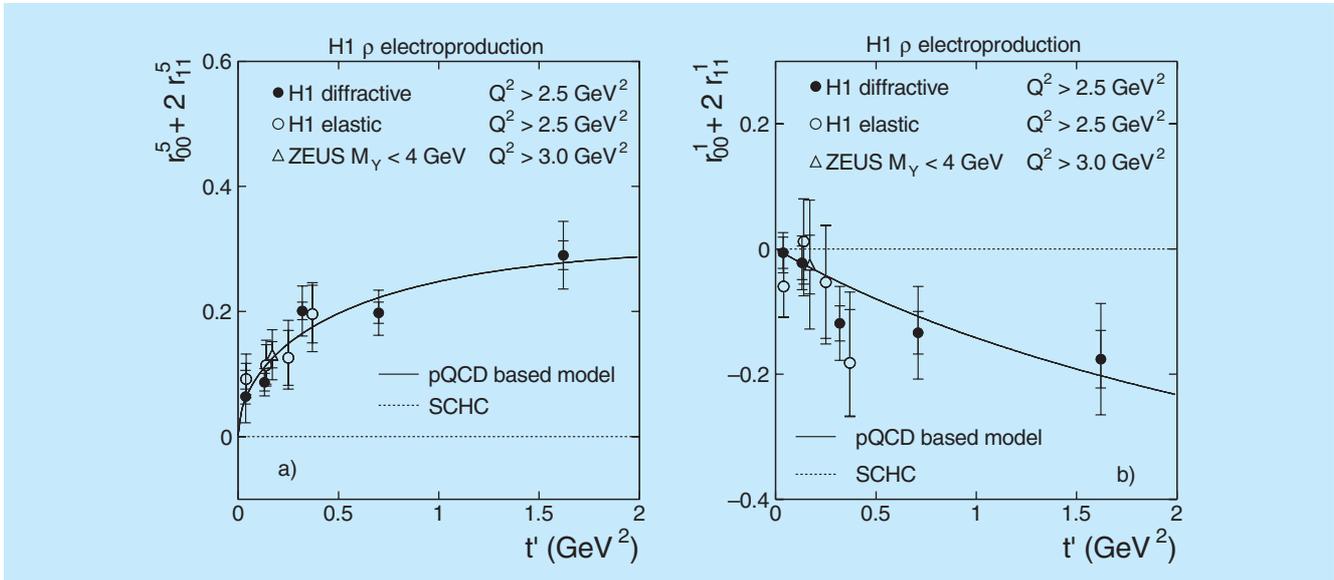


Abbildung 13: Zwei Kombinationen von Dichtematrix-Elementen in der Elektroproduktion von ρ^0 -Mesonen, gemessen als Funktion des quadrierten Proton-Impulsübertrages t' . Die Hypothese der Helizitätserhaltung (SCHC) ist als gepunktete Linie dargestellt. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) weichen mit steigendem t' hiervon ab, sind aber mit der QCD-Rechnung (durchgezogene Kurve) in guter Übereinstimmung.

des Vakuums besitzt. Somit kann diffraktive Streuung als ein Austausch von zwei Gluonen beschrieben werden. Die QCD sagt aber auch den Austausch von farbneutralen Gluon-Kombinationen höherer Multiplizität voraus. Die farbneutrale Kombination von drei Gluonen wird als Odderon bezeichnet, wobei das Odderon Quantenzahlen besitzt, die von denen des Pomerons abweichen. Insbesondere hat das Odderon C-Parität -1 , das Pomeron dagegen $C = +1$. Da das Photon die C-Parität -1 hat, führt die Streuung von Photonen am Pomeron zu Endzuständen mit $C = -1$, zum Beispiel zum Vektormeson ρ^0 , die Streuung von Photonen am Odderon hingegen zu Endzuständen mit $C = +1$. Letztere können zum Beispiel pseudoskalare Mesonen wie das π^0 oder Tensormesonen wie das $f_2(1270)$ sein. Das Odderon wurde schon 1982 in theoretische Überlegungen einbezogen, wobei es um den asymptotischen Verlauf des Hadron-Hadron-Wirkungsquerschnittes bei hohen Energien ging. Ein experimenteller Nachweis des Odderon blieb jedoch aus.

Theoretische Vorhersagen, unter Verwendung der perturbativen QCD, für Streuprozesse mit Austausch eines Odderons resultieren in sehr kleinen Wirkungsquer-

schnitten, die auch bei hoher Luminosität bei HERA kaum nachweisbar sind. Andererseits gibt es aber auch auf nicht-perturbativen Methoden basierende Voraussagen von erheblich höheren Wirkungsquerschnitten, die bei HERA experimentell nachweisbar sein müssten. Dies betrifft zum Beispiel den Prozess $ep \rightarrow e\pi^0 N^*$, für welchen im Rahmen des so genannten Modells des Stochastischen Vakuums ein sehr großer Wirkungsquerschnitt berechnet wurde. Eine experimentelle Suche nach diesem Prozess wurde in den H1-Daten von 1999–2000 durchgeführt. Für die Messung wurde das in Rückwärtsrichtung und dicht am Strahlrohr eingebaute VLQ (Very Low Q^2) Kalorimeter benutzt, in welchem die beiden Photonen aus dem π^0 -Zerfall, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, nachgewiesen wurden. Das vorwärts gestreute, angeregte Proton-System N^* , das in ein Neutron zerfällt, $N^* \rightarrow n\pi^+$, konnte mit dem bei 108 m nahe am Protonenring in der Vorwärtsrichtung installierten Neutron-Kalorimeter (FNC) nachgewiesen werden. Das gestreute Elektron wurde im ebenfalls dicht am Strahlrohr gelegenen Elektron-Kalorimeter (Elektron-Tagger) gemessen, so dass der Hauptdetektor (Drahtkammern und Flüssig-Argon-Kalorimeter) in diesen Ereignissen leer war.

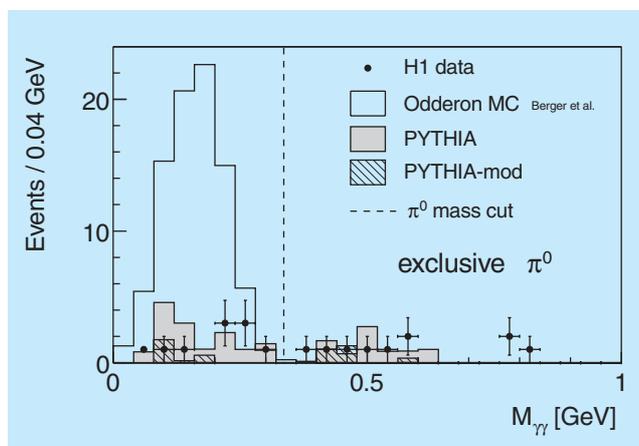


Abbildung 14: Verteilung der invarianten Zwei-Photon-Masse in Ereignissen des Prozesses $e + p \rightarrow \gamma\gamma + e + N^*$. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) liegen weit unter der theoretischen Voraussage der Odderon-induzierten π^0 -Erzeugung (offenes Histogramm) und sind mit dem erwarteten Untergrund (schraffiertes Histogramm) gut verträglich.

Das Ergebnis dieser Suche nach dem Odderon ist in Abbildung 14 dargestellt. Das vorhergesagte Signal wird nicht bestätigt, und die wenigen gefundenen Ereignisse sind mit dem erwarteten Untergrund verträglich. Die sich daraus ergebende obere Grenze des Wirkungsquerschnittes liegt weit unter der theoretischen Vorhersage. Obwohl das Resultat negativ ist, stellt es ein schönes Beispiel der engen Wechselwirkung zwischen Experiment und Theorie in der Hochenergiephysik dar. In diesem speziellen Fall bedarf es weiterer theoretischer Anregung.

In einer weiteren Veröffentlichung wurde die exklusive diffraktive Photoproduktion des $\psi(2S)$ -Mesons studiert. Bei dem $\psi(2S)$ -Meson handelt es sich um den ersten radial angeregten Zustand des bekannteren J/ψ -Mesons, dessen diffraktive Erzeugung in mehreren früheren Arbeiten studiert wurde. Das $\psi(2S)$ -Meson wurde sowohl in den direkten Zerfällen in ein e^+e^- - oder $\mu^+\mu^-$ -Paar beobachtet, als auch in dem Kaskadenzerfall über zwei geladene Pionen, $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$, wobei das J/ψ -Meson wiederum in e^+e^- oder in $\mu^+\mu^-$ zerfällt. Die Messungen betreffen Wirkungsquerschnitte in Abhängigkeit von $W_{\gamma p}$, der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems und von t , dem quadrierten Impulsübertrag auf das Pro-

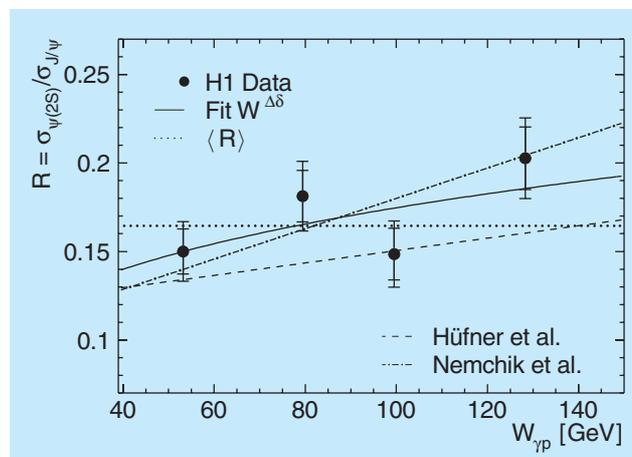


Abbildung 15: Das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für exklusive Erzeugung von $\psi(2S)$ - und J/ψ -Mesonen $R = \sigma_{\psi(2S)}/\sigma_{J/\psi}$ als Funktion der invarianten Photon-Proton-Energie $W_{\gamma p}$. Die durchgezogene Kurve zeigt eine Anpassung der Form $R \propto (W_{\gamma p}/90 \text{ GeV})^{\Delta\delta}$ an die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken), mit $\Delta\delta = 0.24$. Die Größe der Fehler erlaubt es noch nicht, zwischen konstantem Verhältnis (gepunktete Linie) und mit $W_{\gamma p}$ ansteigendem Verhältnis (von der Theorie erwartet, gestrichelte und punkt-gestrichelte Kurven) zu unterscheiden.

ton. Abbildung 15 zeigt das Verhältnis des $\psi(2S)$ -Wirkungsquerschnittes zum entsprechenden Wirkungsquerschnitt für das J/ψ -Meson als Funktion von $W_{\gamma p}$. Im Durchschnitt ist dieses Verhältnis etwa 17% (gepunktete Linie in Abbildung 15).

Die Präzision der Daten erlaubt es gegenwärtig nicht, zu sagen, ob die $\psi(2S)$ - und J/ψ -Erzeugung die gleiche $W_{\gamma p}$ -Abhängigkeit haben oder ob die $\psi(2S)$ -Erzeugung mit der Energie etwas steiler ansteigt, wie Rechnungen in mehreren QCD-Modellen erwarten lassen.

Auch die Abhängigkeit von t , parametrisiert als e^{bt} mit b als frei zu bestimmendem Parameter, wurde mit der J/ψ -Erzeugung verglichen. Hier wurde auch zwischen der rein elastischen Erzeugung und der Protondissoziativen Erzeugung unterschieden. Für letztere wird ein flacherer Verlauf mit t beobachtet als im elastischen Fall. Dies deutet darauf hin, dass im Protondissoziativen Fall das $\psi(2S)$ -Meson, und auch das J/ψ -Meson, an einem effektiv kleineren Teil des Protons gestreut wird als im elastischen Fall. Außerdem unter-

stützen die Daten die Erwartungen von Modellrechnungen, dass die elastische wie auch die Proton-dissoziative $\psi(2S)$ -Erzeugung etwas flacher in t verläuft als die J/ψ -Erzeugung. Letzteres kann durch die unterschiedlichen Wellenfunktionen für den Grundzustand und den ersten radial angeregten Zustand erklärt werden.

Physik jenseits des Standardmodells

Die Suche nach Signalen, die über das Standardmodell hinausweisen, wurde im Berichtsjahr weiter verfolgt, wobei jetzt die gesamten HERA I-Daten zur Verfügung standen. Insbesondere wurde die Suche nach Ereignissen mit einem isolierten Lepton (Elektron, Positron oder Myon) und fehlendem Transversalimpuls fortgesetzt. Solche spektakulären Ereignisse wurden schon in früheren HERA-Daten beobachtet. Eine Erklärung wäre die Erzeugung von W^\pm -Bosonen, die in ein geladenes Lepton und Neutrino zerfallen, wobei das Neutrino den fehlenden Transversalimpuls bewirkt. Allerdings weichen sowohl die beobachtete Rate dieser Ereignisse als auch deren kinematische Eigenschaften von den auf dem Standardmodell beruhenden Erwartungen ab.

Die Suche wurde so optimiert, dass bevorzugt Ereignisse selektiert wurden, die mit W^\pm -Erzeugung verträglich sind. In den Elektron-Proton-Daten wurde ein einziges Ereignis gefunden, in Übereinstimmung mit der Erwartung aus dem Standardmodell. In den Positron-Proton-Daten wurden insgesamt 18 solcher Ereignisse gefunden, gegenüber einer Erwartung von 12.4 ± 1.7 Ereignissen. Dies ist innerhalb der statistischen Unsicherheit in grober Übereinstimmung. Betrachtet man jedoch die Ereignisse bei sehr hohem Transversalimpuls des beobachteten hadronischen Endzustandes, dann stehen 10 Ereignisse einer Erwartung von nur 2.9 ± 0.5 gegenüber. Der Überschuss an Daten gegenüber der Erwartung nach dem Standardmodell ist in Abbildung 16 deutlich zu sehen. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen statistischen Fluktuation ist nur 0.15 %.

Motiviert durch diese Ergebnisse wurde die Suche nach W -Bosonen auch auf hadronische Zerfälle des W -Bosons erweitert. Solche Ereignisse sind durch zwei hochenergetische Teilchen-Jets charakterisiert, die innerhalb der Messgenauigkeit eine mit der W -Masse verträgliche invariante Masse bilden. Solche Ereignisse wurden zwar gefunden, jedoch ist der Untergrund

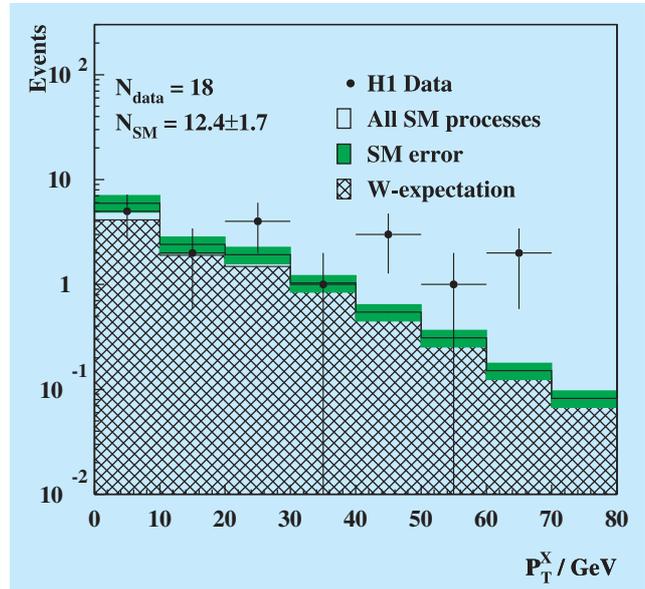


Abbildung 16: Verteilung des hadronischen Transversalimpulses P_T^X in Ereignissen mit isolierten Elektronen, Positronen oder Myonen und fehlendem Transversalimpuls. Die Daten (Messpunkte mit Fehlerbalken) zeigen im Vergleich mit der Erwartung aus dem Standardmodell (Histogramm mit Fehlerband) einen Überschuss bei hohen Werten von P_T^X . Nach dem Standardmodell wird vor allem die Erzeugung von W -Bosonen erwartet (schraffiertes Histogramm).

durch normale Zwei-Jet-Ereignisse zu groß, um weitere Schlüsse zu ziehen.

Spekulationen über eine Erklärung der beobachteten Ereignisse mit Leptonen beinhalten zum Beispiel

- dass die Häufigkeit und Charakteristik der W^\pm -Erzeugung durch einen Prozess verändert wird, der noch nicht in den vorliegenden Rechnungen im Rahmen des Standardmodells berücksichtigt ist,
- oder dass schwere Teilchen produziert werden, die in ein W -Boson und einen hadronischen Jet zerfallen. Dies könnte zum Beispiel ein Top-Quark oder ein supersymmetrisches Teilchen sein.

Mehr Daten sind nötig, um hier mit weiteren Analysen Klarheit zu gewinnen.

Eine fundamentale Frage im Standardmodell ist, warum es drei Generationen von Fermionen gibt und was deren

Massen bestimmt. Eine Antwort wäre das Vorhandensein von Subkonstituenten (Preonen) in den Fermionen, zusammengehalten durch eine neue Kraft. Wenn es eine solche Substruktur der Materie gäbe, dann wäre eine natürliche Konsequenz hieraus die Existenz von angeregten Zuständen der bekannten Leptonen und Quarks. Solche angeregten Zustände der Fermionen aus der ersten Generation könnten bei HERA erzeugt werden, wenn deren Masse im kinematisch zugänglichen Bereich liegt und die entsprechenden Kopplungen an die bekannten Teilchen genügend groß sind.

Im Berichtsjahr wurde, basierend auf den gesamten Daten von HERA I, eine Suche nach angeregten Elektronen e^* veröffentlicht. Die Suche erstreckte sich auf verschiedene Zerfallsmodi des angeregten Elektrons, $e^* \rightarrow e\gamma$, $e^* \rightarrow eZ$ und $e^* \rightarrow \nu W$, die alle im H1-Detektor sehr typische Signaturen haben würden. So wurde nach Ereignissen gesucht, die zwei hochenergetische elektromagnetische Cluster (e, γ) im Kalorimeter aufweisen, oder einen elektromagnetischen Cluster (e) zusammen mit zwei hochenergetischen hadronischen Jets ($Z \rightarrow q\bar{q}$), oder zwei hochenergetische hadronische Jets ($W \rightarrow q\bar{q}$) in Koinzidenz mit hohem fehlenden Transversalimpuls (ν). Es wurden keine solchen Ereignisse gefunden, so dass nur obere Grenzen für deren Produktionsraten bestimmt werden konnten. Diese Grenzen sind abhängig von der Masse des angeregten Elektrons, von dessen Kopplungsstärken f und f' an die Eichbosonen des Standardmodells sowie von der Energieskala Λ der angenommenen Substruktur. Die Kopplungsstärken f und f' beziehen sich hier auf die beiden Symmetriegruppen $U(1)$ und $SU(2)$ der elek-

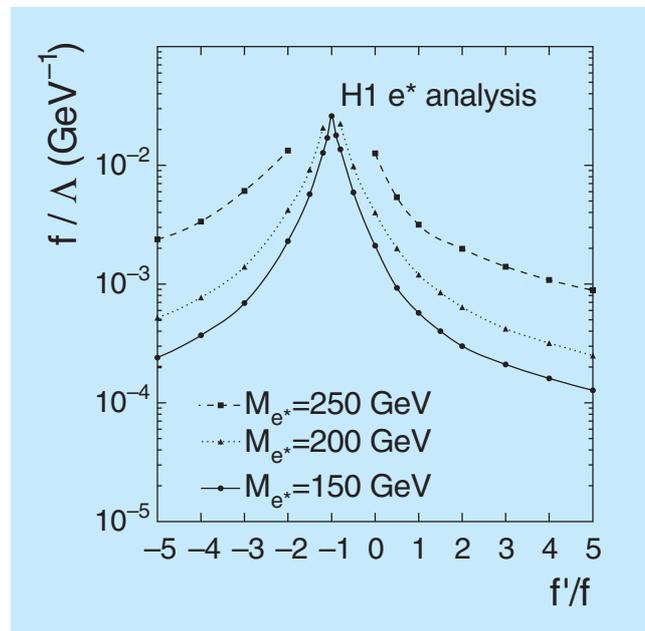


Abbildung 17: *Resultat der Suche nach angeregten Elektronen e^* : dargestellt sind Grenzen für die maximal mögliche Stärke f/Λ der Erzeugung von e^* als Funktion des Verhältnisses f'/f der Eichkopplungen für drei verschiedene Werte der Masse M_{e^*} des angeregten Elektrons.*

trochwachen Wechselwirkung. Abbildung 17 zeigt die Obergrenzen für f/Λ als Funktion des Verhältnisses f'/f für verschiedene Massen des angeregten Elektrons. Die neuen Grenzen sind wesentlich sensitiver als frühere und wurden erstmalig in Abhängigkeit vom Verhältnis f'/f bestimmt.

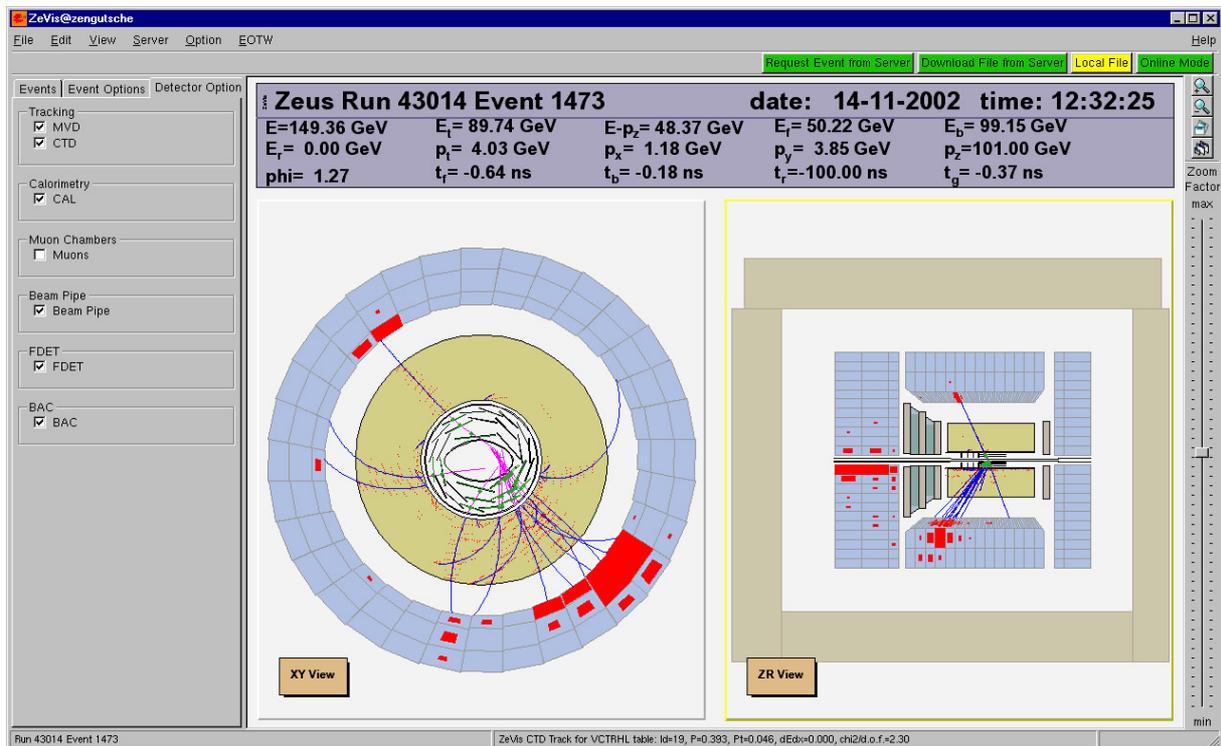


Abbildung 18: Ein Ereignis der tiefinelastischen Positron-Proton Streuung im ZEUS-Detektor, dargestellt mit der neuen ZEUS Visualisierungssoftware ZeVis. Klar zu erkennen ist das gestreute Positron im zentralen Teil des Kalorimeters. Deutlich sind auch die Hits im Mikrovertexdetektor zu erkennen, die eine Rekonstruktion der Teilchenspuren bis dicht an den Wechselwirkungspunkt erlauben.

ZEUS-Experiment

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

Sprecher: B. Foster, Univ. of Bristol

Die Wiederinbetriebnahme von HERA nach dem Umbau zur Luminositätserhöhung erwies sich als schwieriger als zunächst angenommen. Es gelang relativ schnell zu zeigen, dass das generelle Konzept des Umbaus erfolgreich ist und der Beschleuniger die geplante spezifische Luminosität erreicht. Allerdings ist der Strahlungsuntergrund im Detektor so groß, dass die Strahlströme weit unterhalb der Designwerte bleiben mussten, um eine Beschädigung des Detektors zu vermeiden. Ein großer Teil der Strahlzeit wurde zum Verständnis des Untergrundes aufgewendet. Bei ZEUS sind die Verschlechterung des Vakuums durch den Positronenstrahl sowie gestreute Synchrotronstrahlung für den Untergrund verantwortlich.

Die Resultate dieser Untersuchungen wurden von einem internationalen Komitee begutachtet und mündeten in der Empfehlung, im März 2003 den Strahlbetrieb zu unterbrechen, um die Absorber für Synchrotronstrahlung in der Wechselwirkungszone zu verbessern. Gleichzeitig sollen in HERA Verbesserungen am Vakuumsystem vorgenommen werden.

Seit Ende Oktober führte HERA einen routinemäßigen Datennahmebetrieb durch. Bis zum Ende des

Jahres wurde eine Luminosität von 2.2 pb^{-1} geliefert, von der ZEUS 1.4 pb^{-1} aufgezeichnet hat. Die Daten werden benutzt, um den neuen Mikrovertexdetektor zu testen und zu vermessen sowie um das Datennahmesystem zu testen.

Wissenschaftlich war der Berichtszeitraum sehr fruchtbar. Die ZEUS-Kollaboration hat 16 Veröffentlichungen mit den bis zum Herbst 2000 genommenen Daten verfasst. Einige der Resultate werden in diesem Bericht vorgestellt und diskutiert.

ZEUS Betrieb

Der Experimentierbetrieb bei ZEUS stand im Zeichen der Inbetriebnahme von HERA und ZEUS nach dem großen Umbau der Jahre 2000 und 2001. Es gelang schnell zu zeigen, dass der Beschleuniger den Designwert seiner spezifischen Luminosität von $1.7 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ erreicht. Damit wurde bewiesen, dass das Konzept der Luminositätserhöhung funktioniert. Allerdings stellte sich heraus, dass der Strahlungsuntergrund in den beiden Detektoren ZEUS und H1 unerwartet groß ist. Ein Betrieb bei hohen Strömen

und damit hoher Luminosität hätte zu einer Beschädigung der Detektoren geführt. Ein großer Teil der Strahlzeit des Berichtjahres wurde deshalb darauf verwendet, den Untergrund zu studieren. Drei Untergrundquellen wurden dabei gefunden:

- Synchrotronstrahlung,
- Positron-Restgas-Wechselwirkungen,
- Proton-Restgas-Wechselwirkungen.

Um hohe Luminosität zu erreichen, stehen bei HERA die letzten Magnete sehr dicht an der Wechselwirkungszone. Deshalb muss ein Teil der Synchrotronstrahlung durch die Wechselwirkungszone geführt werden. Sie wird größtenteils 11 m strahlabwärts in einem Septumabsorber absorbiert. Als Schutz gegen von dort rückgestreute Synchrotronstrahlung besitzt ZEUS ein System von drei Absorbern zwischen 0.8 m und 1.7 m. Es stellte sich heraus, dass vom innersten dieser Absorber Photonen, die am Septumabsorber reflektiert wurden, in die zentrale Spurkammer gestreut werden und dort zum Kammerstrom beitragen.

Weiter können Wechselwirkungen des Positronenstrahls mit Restgasmolekülen zu einem Energieverlust der gestreuten Positronen führen, die durch die HERA-Magnete von der Sollbahn abgelenkt werden und das zentrale ZEUS-Strahlrohr oder den ZEUS-Absorber treffen und dort anschauen. Teilchen aus diesen elektromagnetischen Schauern führen zu erhöhtem Strom in der zentralen Driftkammer.

Während des Luminositätsbetriebes wurde der Untergrund durch Protonenstrahl-Gas-Wechselwirkungen dominiert. Dabei führen die Synchrotronstrahlung vom Positronenstrahl sowie Hochfrequenzverluste zu einer erhöhten Desorptionsrate an getroffenen Oberflächen und verschlechtern dort lokal das Vakuum.

Die Untergrundbedingungen lassen sich durch folgende Maßnahmen soweit verbessern, dass ein Betrieb des ZEUS-Detektors bei den Designströmen möglich wird:

Der Synchrotronstrahlungsuntergrund, der die zentrale Kammer trifft, kann durch Änderung der drei ZEUS-Absorber um einen Faktor 10 reduziert werden. Eine spezielle Beschichtung des Septumabsorbers kann die rückgestreute Synchrotronstrahlung um einen Faktor 1.6 reduzieren.

Der Untergrund durch Positronenstrahl-Gas-Wechselwirkungen kann ebenfalls durch eine Änderung des innersten ZEUS-Absorbers sowie eine Verbesserung des HERA-Vakuumsystems verringert werden.

Die Verringerung des Untergrundes durch Protonenstrahl-Gas-Wechselwirkungen ist am schwierigsten und erfordert eine Vielzahl von Maßnahmen. Dazu gehören eine Verbesserung des Vakuumsystems in der Nähe der Wechselwirkungszone, eine Verschlinkung der ZEUS-Absorber, eine Reduktion der Hochfrequenzverluste und eine Verringerung der Rückstreuung von Synchrotronstrahlung am Septumabsorber.

Im November 2002 und im Januar 2003 hat eine internationale Expertenkommission die Ergebnisse der Studien und die Verbesserungsvorschläge begutachtet und dem Vorschlag zugestimmt, im März 2003 den Experimentierbetrieb zu unterbrechen, um die vorgeschlagenen Verbesserungen zu realisieren.

Seit dem 30. Oktober führt HERA einen routinemäßigen Datennahmebetrieb durch. Bis zum Ende des Jahres wurde eine Luminosität von 2.2 pb^{-1} geliefert, von der ZEUS 1.4 pb^{-1} aufgezeichnet hat. Wegen der beschriebenen Untergrundprobleme konnten nur bei etwa einem Viertel der aufgezeichneten Daten die innere Spurkammer und der Mikrovertexdetektor betrieben werden. Die Daten wurden benutzt, um die neuen Detektorkomponenten zu testen, zu eichen und zu vermessen.

Mikrovertexdetektor

Der Mikrovertexdetektor wurde im Jahr 1997 vom DESY PRC genehmigt und in der Folge entwickelt und gebaut. Während der Betriebsunterbrechung in den Jahren 2000/2001 wurde er im Innern des ZEUS-Detektors installiert.

Der gesamte Mikrovertexdetektor besteht aus dem zylindrischen Zentralteil mit drei Lagen Siliziumsensoren und einem Vorwärtsteil, bestehend aus vier radförmigen Sensorebenen, die senkrecht zur Strahlachse angeordnet sind. Der Detektor verfügt über etwa 200 000 Auslesekanäle.

Im Januar 2002 wurden erfolgreich etwa 2 Millionen kosmische Myon-Ereignisse aufgezeichnet, die in der

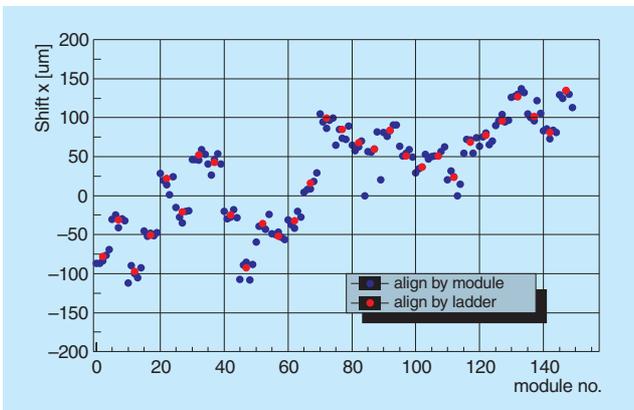


Abbildung 19: Die Abweichung vom Sollwert der x Position in μm für jedes Modul im Zentralbereich des ZEUS Mikrovertexdetektors.

Folge zur Vermessung der präzisen Lage des Detektors relativ zur zentralen Spurkammer und der Lage der einzelnen Sensoren im Zentralbereich des ZEUS-Detektors verwendet wurden. Abbildung 19 illustriert die Ergebnisse dieser Vermessung. Sie zeigt für jedes der 150 Module im Zentralbereich des Detektors die gemessenen Abweichungen vom Sollwert der x Position in μm .

Die maximalen gemessenen Abweichungen von der Sollgeometrie des Detektors betragen etwa $100\ \mu\text{m}$. Das bestätigt die hervorragende mechanische Präzision des Detektors.

Während der Datennahmepériode im Jahr 2002 war die Auslese des Mikrovertexdetektors routinemäßig in die Auslese des ZEUS-Experiments integriert. Unter Luminositätsbedingungen sind dabei mehr als 3 Millionen Elektron-Proton Ereignisse mit dem Mikrovertexdetektor aufgezeichnet worden.

Datenverarbeitung

Das Datennahmesystem hat sich unter realistischen Bedingungen bewährt und gezeigt, dass es auch hohe Raten bei geringer Totzeit verarbeiten kann. Ein 400 GByte DESY-Linux-Fileserver, der an das dCache-System angeschlossen ist, wird als Zwischenspeicher der Daten

eingesetzt, bevor sie von der ZEUS-Halle zum Rechenzentrum am DESY zur Weiterverarbeitung geschickt werden.

Die dritte Stufe des ZEUS-Triggers basiert auf einer Prozessorfarm und dient der endgültigen Auswahl und Klassifizierung der physikalischen Ereignisse. Sie wurde während des HERA-Umbaus auf eine Farm von Standard PCs umgestellt und ihre Software wurde in wesentlichen Teilen neu geschrieben. Die Datennahme hat gezeigt, dass diese Umstellung erfolgreich war und das neue System auch große Datenraten problemlos handhaben kann.

Die zentrale ZEUS-Analyseplattform ZARAH wurde mit 20 modernen Doppelprozessoreinheiten auf Basis des Intel Xeon erweitert, womit die Analysekapazität trotz gleichzeitiger Stilllegung älterer Systeme verdoppelt wurde. Das ZEUS Massenspeicherkonzept wurde auf das dCache-System umgestellt, wobei der als Cache von Magnetbanddateien verwendete Onlinespeicher unter Einsatz von RAID-Technologie auf 20 TB vergrößert wurde.

Die Produktion simulierter Ereignisse, welche bei ZEUS mittels des Funnel-Systems auf weltweit über 20 Rechnersysteme verteilt durchgeführt wird, erreichte mit 240 Millionen Ereignissen ein neues Rekordergebnis.

Im Zusammenhang mit der Inbetriebnahme der neuen Detektorkomponenten wurde auch eine neue Software zur graphischen Visualisierung von Ereignissen geschaffen. Das Programm ZeVis (Abb. 18) ist vollständig objekt-orientiert für den Client-Server Betrieb konzipiert und erlaubt den direkten Zugriff auf ZEUS-Ereignisse über das Internet.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtsjahr hat sich die ZEUS-Kollaboration auf die Veröffentlichungen weiterführender Physikanalysen der e^+p Daten der Jahre 1995–1997 (12 Publikationen) sowie der e^-p Daten der Jahre 1998–1999 (2 Publikationen) konzentriert. Insgesamt wurden 16 wissenschaftliche Arbeiten publiziert. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser interessanten Ergebnisse vorgestellt.

Mit Jets der Stärke der Farbkraft auf der Spur

Die präzise Vermessung der Struktur des Protons durch die beiden HERA-Experimente ZEUS und H1 hat maßgeblich zur weiteren Bestätigung der Quantenchromodynamik (QCD) als Theorie der starken Wechselwirkung beigetragen. Basierend auf dieser Theorie wandelte sich das eher statische, einfache Bild des Protons, bestehend aus drei unzerstörbaren Bausteinen, den Quarks, zu einem dynamischen Bild, je tiefer in das Proton hineingeschaut wurde. Die Quarks im Proton werden durch die Gluonen, die Träger der starken Kraft, nicht nur einfach zusammengehalten und garantieren so dessen Stabilität, sondern das Innere des Protons generiert sich dynamisch aus der steten Wechselwirkung der Farbladungen der Quarks und Gluonen (Partonen). Die Quantentheorie erlaubt es wiederum den Gluonen, sich kurzzeitig in Quark-Antiquark-Paare umzuwandeln oder sich in zwei Gluonen aufzuspalten. Die Stärke, mit der die Farbkraft zwischen den Partonen ausgetauscht wird, kann durch die starke Kopplungskonstante α_s charakterisiert werden. Die QCD sagt voraus, dass die Stärke der Farbkraft und damit die Größe von α_s empfindlich vom Abstand zwischen den Partonen abhängt. Für sehr kleine Abstände (große Skalen) hat diese Vorhersage die bemerkenswerte Konsequenz, dass die Partonen sich quasi wie freie Teilchen verhalten und die starke Kopplung sehr schwach wird.

Untersuchungen der Produktion von Teilchenbündeln (Jets) in hochenergetischen Teilchenkollisionen gehören zu den wichtigsten Methoden, die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen zu untersuchen. HERA, als einziger Speicherring hochenergetischer Elektronen- und Protonenstrahlen, bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, α_s mittels der Eigenschaften des hadronischen Endzustandes zu messen und die damit einhergehenden verschiedenen systematischen und Modell-Abhängigkeiten gegeneinander abzuwägen und so die Kenntnisse über die starke Kopplung deutlich zu erweitern. Im Berichtsjahr hat die ZEUS-Kollaboration mit vier Publikationen entscheidende Beiträge zu diesem Thema geliefert, von denen die drei wichtigsten Messungen hier diskutiert werden.

In dem einfachsten tiefunelastischen Elektron-Proton-(ep)-Streuprozess werden nach dem Austausch eines

virtuellen Photons im hadronischen Endzustand zwei Teilchenbündel (1+1 Jets) erzeugt, ein Jet folgt dem aus dem Proton herausgeschlagenen Quark und ein Jet formt sich aus den Resten des Protons. Tragen Gluonen zu der Produktion der Teilchenbündel bei, so kann sich im hadronischen Endzustand zusätzlich ein weiterer hochenergetischer Jet bilden (2+1). Theoretisch können solche Prozesse mit der QCD-Störungstheorie modelliert werden. In führender Ordnung α_s gehören dazu der QCD-Compton-Prozess, bei dem ein Gluon vom herausgeschlagenen Quark abgestrahlt wird und die Quelle für einen weiteren Jet bildet, sowie die Boson-Gluon-Fusion, in der das virtuelle Photon mit einem der Quarks eines Quark-Antiquark-Zustandes wechselwirkt, in den ein Gluon aus dem Proton fluktuiert ist.

Der Vergleich der 2+1 Jetrate oder Dijetrate zu der 1+1 Jetrate ist demzufolge empfindlich auf die Stärke der Kopplung α_s . Diese α_s -Messung, über die bereits im Jahr 2001 berichtet wurde, ist jedoch mit einer theoretischen Unsicherheit behaftet, die sich aus der Schwierigkeit einer eindeutigen Definition des Dijet-Streuquerschnitts für eine feste Ordnung in α_s ergibt. Diese Unsicherheit entfällt für inklusive Jet-Produktion, bei der alle Teilchenbündel aufsummiert werden.

Raten inklusiver hadronischer Reaktionen können für den Fall hoher Q^2 -Skalen oder hoher Transversalimpulse, oder wenn die Masse des erzeugten Teilchens groß ist, mit den Mitteln der störungstheoretischen QCD berechnet werden. Neue ZEUS-Messungen der inklusiven Jetproduktion in tiefunelastischer Streuung bei sehr hohen Q^2 -Skalen, $Q^2 > 500 \text{ GeV}^2$, oder hohen transversalen Jetenergien, $E_T^{\text{jet}} > 14 \text{ GeV}$, konnten eine gute Übereinstimmung des differentiellen Streuquerschnitts mit den QCD-Vorhersagen belegen.

Die hohe Qualität der Daten der Jahre 1996/97 mit einer integrierten Luminosität von 36 pb^{-1} gestattete es zudem, eine QCD-Anpassung des inklusiven Jet-Streuquerschnitts in Abhängigkeit von Q^2 und E_T^{jet} durchzuführen. Abbildung 20 zeigt die gemessene Skalenabhängigkeit von α_s , die den Erwartungen der QCD entspricht. Darüber hinaus wurde die Größe der starken Kopplungskonstanten α_s für $Q = M_Z$ (Masse des Z-Bosons) mit verbesserten systematischen Unsicherheiten bestimmt:

$$\alpha_s = 0.1212 \pm 0.0017(\text{stat})_{-0.0031}^{+0.0023}(\text{syst})_{-0.0027}^{+0.0028}(\text{th}).$$

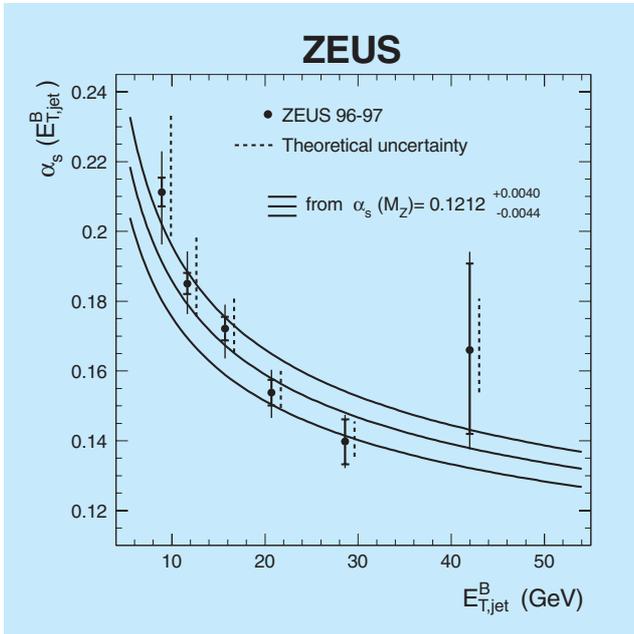


Abbildung 20: Abhängigkeit der Kopplungsstärke α_s von der E_T^{jet} Skala, bestimmt aus der QCD-Anpassung des differentiellen Jet-Wirkungsquerschnitts für $Q^2 > 500 \text{ GeV}^2$. Die gestrichelten Linien entsprechen der Modellunsicherheit.

Einen neuartigen Test der starken Wechselwirkung, der auf einer genauen Untersuchung der inneren Struktur der Jets basiert, hat die ZEUS-Kollaboration mit demselben Datensatz durchgeführt.

Im einfachsten Fall des Quark-Parton-Modells resultiert der Jet aus der Hadronisierung des herausgeschlagenen Partons, und der Jet weist keine innere Struktur in Form von Subjets auf. Die Anzahl der Subjets (Subjet-Multiplizität) ist eins. Allerdings kann die Abstrahlung von Gluonen mit niedrigem Transversalimpuls innerhalb des Jets zur Bildung von weiteren Subjets führen. Diese Emission von Partonen innerhalb des Jets ist wiederum proportional zur Kopplungskonstanten α_s . Die Abweichung der Subjet-Multiplizität von eins ist von der ZEUS-Kollaboration gemessen worden und in Abbildung 21 dargestellt. Für hohe transversale Jetenergien, $E_T^{\text{jet}} > 15 \text{ GeV}$, wird die gemessene Subjet-Multiplizität sehr gut von der QCD-Störungstheorie beschrieben und ermöglicht so eine alternative Be-

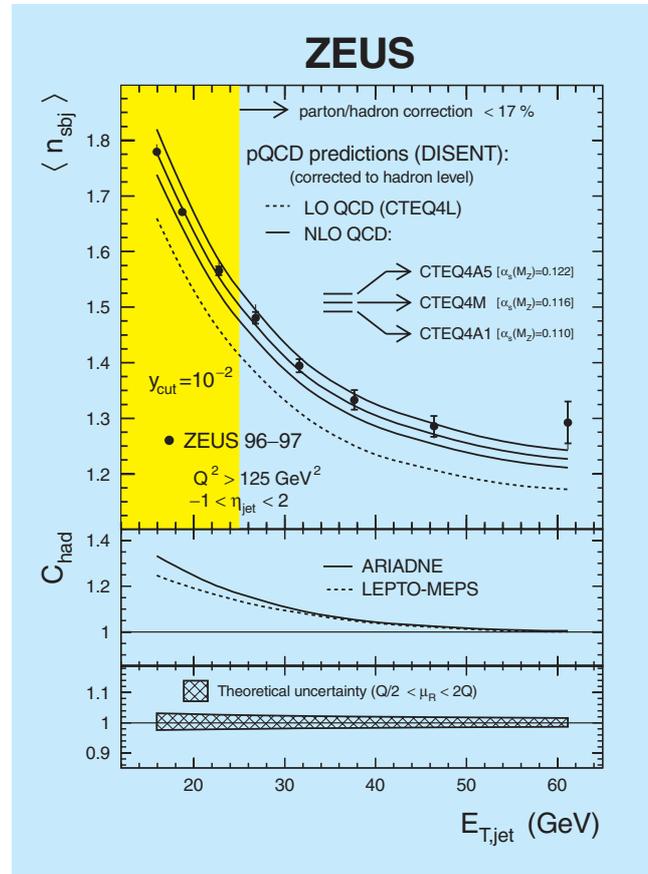


Abbildung 21: Die mittlere Anzahl $\langle n_{\text{sbj}} \rangle$ der Subjets innerhalb des Jets nimmt mit steigendem E_T^{jet} ab. Dies wird durch die QCD-Störungstheorie in der nächst höheren Entwicklung in α_s (NLO QCD) korrekt beschrieben.

stimmung von α_s , die unabhängig von der genauen Kenntnis der Impulsverteilungen der Partonen im Proton ist.

Die bisher beste statistische Genauigkeit für eine Messung von α_s bei ZEUS konnte basierend auf der hohen integrierten Luminosität von 82 pb^{-1} der Jahre 1998–2000 durch die QCD-Analyse inklusiver Jetproduktionsraten in Photoproduktion erfolgen. In der Photoproduktion werden fast reelle Photonen ($Q^2 \approx 10^{-3} \text{ GeV}^2$) im ep-Streuprozess ausgetauscht, wobei das Photon entweder indirekt mittels eines der Partonen seiner hadronischen Komponente oder direkt mit dem Quark im Proton wechselwirkt. Die für QCD-störungstheoretische Rechnungen notwendige harte Skala wird durch den Be-

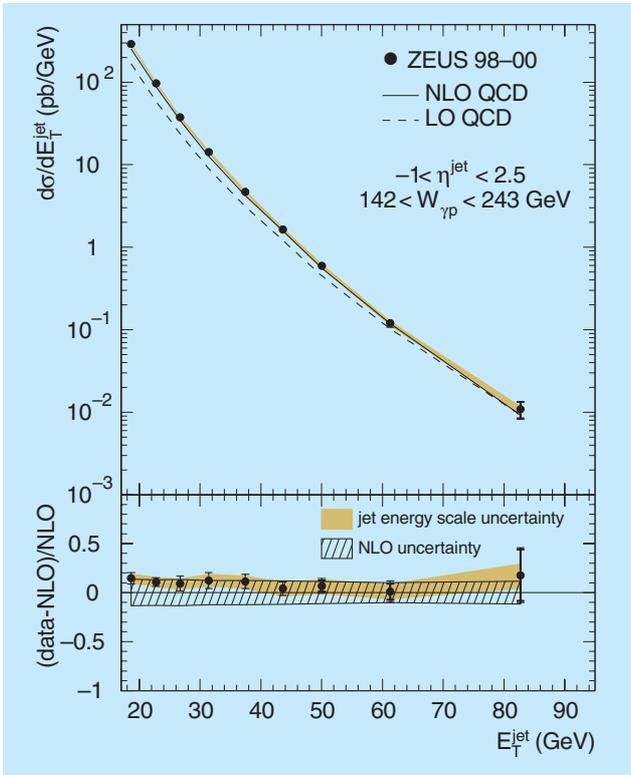


Abbildung 22: Der gemessene differentielle inklusive Jet-Streuquerschnitt zeigt einen starken Abfall mit steigender transversaler Jetenergie E_T^{jet} , der durch die QCD-Störungstheorie (NLO QCD) sehr gut vorhergesagt werden kann.

reich hoher transversaler Jet-Energien, $E_T^{\text{jet}} > 17 \text{ GeV}$, gewährleistet.

Die HERA-Schwerpunktenergie von 318 GeV ermöglicht Messungen des inklusiven Jet-Streuquerschnitts über einen weiten Energiebereich von 142 GeV bis 293 GeV im Photon-Proton-Schwerpunktssystem. Komplementär zu den Jet-Streuquerschnittsmessungen in Proton-Antiproton-Kollisionen bei Schwerpunktsenergien bis zu 1800 GeV weisen diese ZEUS-Daten erstmalig die gute QCD-Beschreibung sowohl der Form als auch der Größe des gemessenen Jet-Streuquerschnitts in Photon-Proton-Wechselwirkungen nach, wie in Abbildung 22 dargestellt. Die QCD-Vorhersagen (NLO QCD) des inklusiven Jet-Streuquerschnitts beinhalten sowohl die Skalenabhängigkeit der Partondichteverteilungen des kollidierenden Hadrons als auch die Energieabhängigkeit der star-

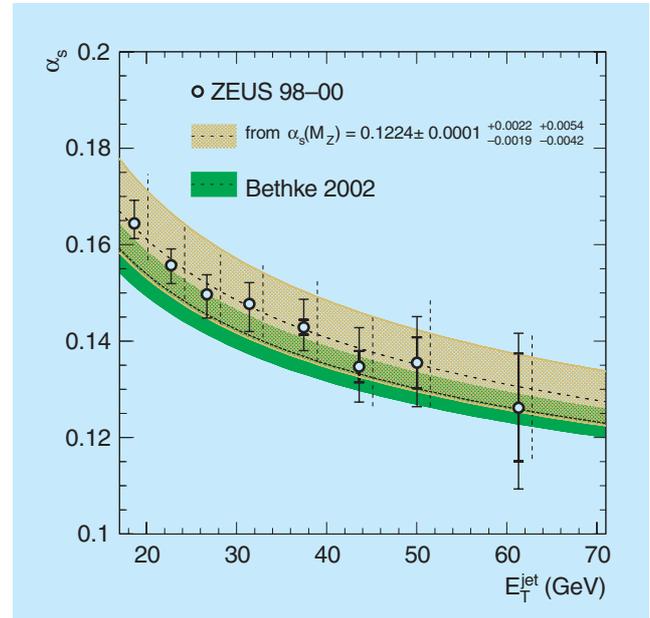


Abbildung 23: Die Genauigkeit der α_s -Messung in Photoproduktion ist dominiert durch die theoretischen Unsicherheiten (gestrichelte Linien) in der QCD-Beschreibung der Terme, die nicht in der nächstfolgenden Ordnung von α_s enthalten sind. Die Kurve „Bethke 2002“ entspricht dem Weltmittelwert für α_s .

ken Kopplungskonstanten. Eine QCD-Anpassung des in E_T^{jet} differentiellen Jet-Wirkungsquerschnitts liefert daher, ähnlich der in Abbildung 20 dargestellten Messung aus tiefinelastischer ep-Streuung, eine Bestimmung der starken Kopplungskonstanten α_s . Die Größe für α_s für die Skala $Q = M_Z$ sowie die Energieabhängigkeit von α_s sind in Abbildung 23 dargestellt. Ein Vergleich der Resultate der Abbildungen 20 und 23 verdeutlicht die verbesserte Präzision der vorgelegten Analyse von $\alpha_s(E_T^{\text{jet}})$ insbesondere für hohe transversale Jetenergien, $E_T^{\text{jet}} > 30 \text{ GeV}$. Die beobachtete Energieabhängigkeit von $\alpha_s^{-1}(E_T^{\text{jet}}) \propto \ln E_T^{\text{jet}}$ liefert gute Übereinstimmung mit der QCD-Vorhersage, dass im betrachteten E_T^{jet} -Bereich fünf Quarksorten (Flavours) aktiv beitragen.

Alle HERA-Resultate für α_s befinden sich in guter Übereinstimmung, sowohl untereinander als auch im Vergleich mit dem Weltmittelwert. Diese Übereinstimmung der mit verschiedenen Methoden gemessenen Werte von α_s ist ein empfindlicher Test der Theorie der starken Wechselwirkung.

Bestimmung der Impulsverteilungen der Partonen

Tiefunelastische Streuprozesse $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$ und die damit verbundene Bestimmung der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} können von allen HERA-Prozessen zur Zeit mit der besten Präzision sowohl gemessen als auch theoretisch beschrieben werden. Der starke Anstieg der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} , der bereits früh bei HERA entdeckt wurde, weist insbesondere auf die Zunahme der Gluondichte im Proton mit steigender Q^2 -Skala hin. Neue und exaktere ZEUS-Daten der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} , die bereits im Jahr 2001 vorgestellt wurden, erlauben einen genaueren Test der störungstheoretischen QCD nach dem DGLAP-Schema. Die Anpassung an die ZEUS-Daten erfolgt unter anderem zusammen mit Daten der Deuteron-Strukturfunktion von den Fixed Target Experimenten NMC und E665. Das ermöglicht eine bessere Trennung der u- und d-Quarks, jedoch nur für den kinematischen Bereich großer Protonimpulsanteile x und moderater Q^2 -Werte.

Die vorgelegte Analyse konnte nachweisen, dass die QCD-Störungstheorie die Abhängigkeit der Partondichte über fünf Größenordnungen von Q^2 vorhersagen kann, das heißt für Abstände zwischen den Partonen im Bereich von $1/1000$ bis zu $1/5$ des Protondurchmessers. Im Gegensatz dazu kann die QCD-Störungstheorie nicht vorhersagen, wie sich bei einer fest gewählten Q^2 -Skala die Dichte mit dem Anteil des Partons am Protonimpuls entwickelt. Diese Abhängigkeit kann nur basierend auf der Messung der x -Abhängigkeit der Strukturfunktion mit Hilfe von physikalischen Modellvorstellungen parametrisiert werden. Hierfür ist jedoch im Prinzip eine einzige Messung bei einem Q^2 -Wert völlig ausreichend, jede weitere Änderung der Skala kann durch die QCD-Störungstheorie berechnet werden.

Abbildung 24 gibt ein Beispiel für die x -Abhängigkeit der Partonverteilungen für den Fall des reinen Photon-Austausches bei einer Q^2 -Skala von 10 GeV^2 , was einer Auflösung von etwa $1/17$ des Protondurchmessers entspricht. Hierbei entsprechen kleinere x -Werte immer kleiner werdenden Anteilen vom Protonimpuls, die das Parton trägt. Eine Aufschlüsselung nach den einzelnen Partonsorten zeigt, dass sich im Bereich $x > 0.1$ der Protonimpuls im Wesentlichen zwischen den Rumpfen der u- und d-Quarks aufteilt. Die Eigenschaften dieser

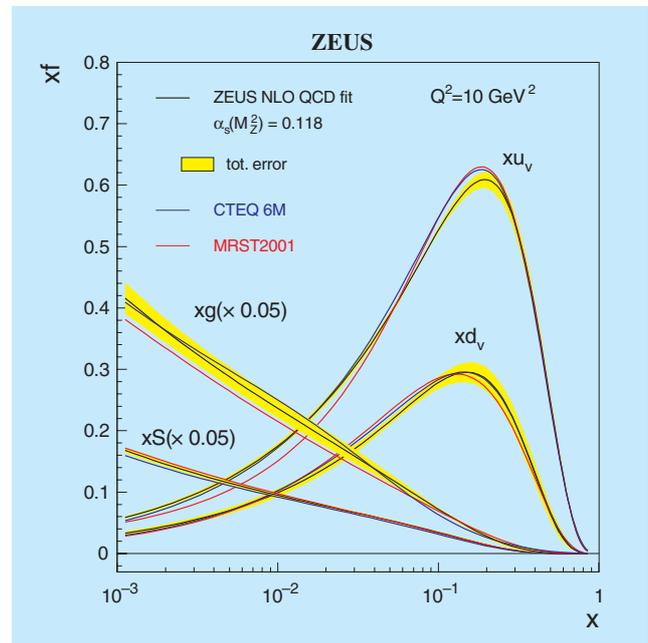


Abbildung 24: Impulsverteilungen der u- und d-Valenzquarks, der Seequarks und der Gluonen in Abhängigkeit vom Protonimpulsanteil x .

so genannten Valenzquarks (xu_v , xd_v) geben dem Proton unter anderem auch seine elektrische Ladung. Für Werte $x < 0.1$ nimmt die Neigung der Quarks rasch zu, Gluonen zu emittieren, die sich ihrerseits in Quark-Antiquark-Paare aufspalten können und so den Proton-See generieren. Infolge dieser Quark-Gluon-Dynamik der QCD verteilt sich der Protonimpuls auf immer mehr Partonen, insbesondere die Impulsverteilungen der Seequarks und der Gluonen wachsen stark an.

Die besondere Bedeutung der ZEUS-Daten liegt in der genauen Vermessung des starken Anwachsens der Impulsverteilungen der Seequarks und der Gluonen einschließlich der sorgfältigen Evaluation der Fehlerbänder, die als schattierte Flächen in Abbildung 24 eingezeichnet sind. Erst die genaue Kenntnis der Partonverteilungsfunktionen ermöglicht die Vorhersage hadronischer Reaktionen für neuartige Teilchenbeschleuniger, wie zum Beispiel den Large Hadron Collider (LHC) am CERN, und deren Entdeckungspotenziale.

Die Präzision der ZEUS F_2^{em} -Daten bei kleinen Protonimpulsanteilen, das heißt im Bereich sehr hoher Gluondichten, erlaubt es, gleichzeitig zur Form der

Partondichteverteilungen auch die Größe der starken Kopplung durch die QCD-Störungstheorie anzupassen. Unter besonderer Berücksichtigung der Fehlerkorrelationen ergibt sich für $Q = M_Z$ damit ein Wert von $\alpha_s = 0.1166 \pm 0.0008(\text{unkorr}) \pm 0.0032(\text{korr}) \pm 0.0032(\text{model})$.

Messung der Interferenz-Strukturfunktion xG_3

Für den Q^2 -Bereich kleiner als 100 GeV^2 wird der tief-unelastische $e^\pm p$ -Wirkungsquerschnitt fast ausschließlich durch das Wirken der elektromagnetischen Kraft über den Austausch eines virtuellen Photons dominiert, die eine direkte Messung der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} ermöglicht. Mit steigenden Impulsüberträgen werden jedoch mit etwa Q^2/M_Z^2 anwachsende Beiträge der schwachen Kraft erwartet.

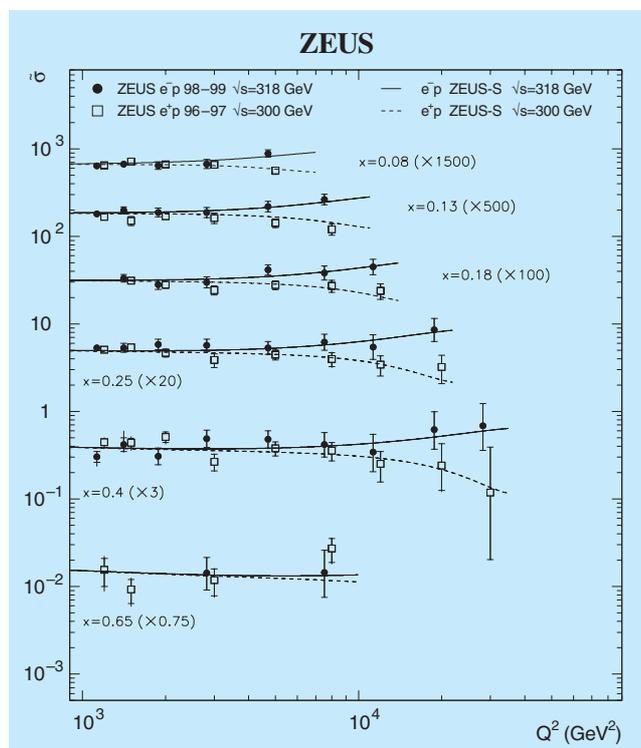


Abbildung 25: Für sehr hohe Q^2 -Skalen sind die ladungsabhängigen Beiträge der Photon-Z-Boson-Interferenz klar im unterschiedlichen Verhalten des reduzierten Streuquerschnitts der $e^\pm p$ -Streuung sichtbar.

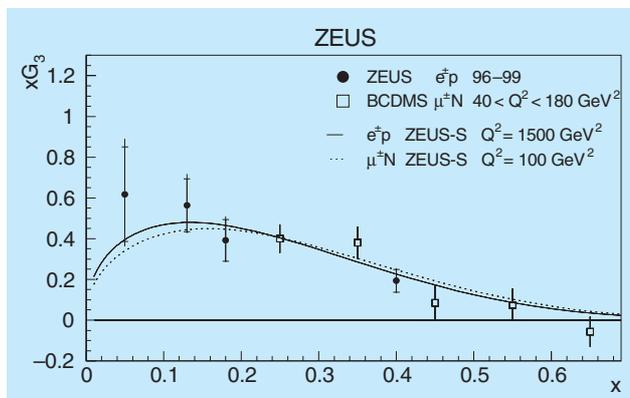


Abbildung 26: Die Interferenz-Strukturfunktion des Protons xG_3 misst bei den hier betrachteten Protonimpulsanteilen $x \geq 0.05$ im Wesentlichen die Summe der Impulsverteilungen der u - und d -Valenzquarks.

Während Beiträge durch einen reinen Z-Boson-Austausch bisher bei allen HERA-Messungen klein sind, konnten Änderungen im gemessenen $e^\pm p$ -Streuquerschnitt durch die Interferenz des Ein-Photon- und des Z-Boson-Austausches nachgewiesen und neue Kenntnisse über die Protonstruktur erhalten werden.

Die ZEUS-Kollaboration hat die Streuquerschnitte sowohl für Positron-Proton- als auch für Elektron-Proton-Streuung bei sehr hohen Q^2 -Skalen, $185 < Q^2 < 50\,000 \text{ GeV}^2$, bestimmt. Von besonderem Interesse sind hier die Elektronenstrahl-Daten der Jahre 1998–1999, die einer integrierten Luminosität von 16 pb^{-1} entsprechen.

Ein Vergleich der reduzierten (das heißt von kinematischen Abhängigkeiten bereinigten) Streuquerschnitte $\tilde{\sigma}$ der $e^\pm p$ -Streuung ist in Abbildung 25 dargestellt. Die hier beobachtete Abhängigkeit von der Ladung entspricht den Erwartungen des Standardmodells der Teilchenphysik. Für sehr hohe Q^2 -Skalen steigt der Streuquerschnitt für Elektron-Proton-Streuung an, sinkt jedoch für Positron-Proton-Streuung. Die Differenz der beiden Streuquerschnitte liefert neue Informationen über die Protonstruktur, die so genannte Interferenz-Strukturfunktion xG_3 . Die ZEUS-Messung von xG_3 wird in Abbildung 26 zusammen mit den xG_3 -Daten aus Myon-Kohlenstoff-Streuung (BCDMS) gezeigt. Im Vergleich zu den älteren Daten erweitert die ZEUS-Messung den kinematischen Bereich bis hin zu kleinen Protonimpulsanteilen $x = 0.05$.

Die Interferenz-Strukturfunktion xG_3 liefert im Wesentlichen Aussagen über die Differenz der Quark- und Antiquark-Verteilungen im Proton, die für die hier betrachteten recht großen Protonimpulsanteile die Verteilung der u- und d-Valenzquarks misst. Die in Abbildung 26 sichtbare nur schwache Abhängigkeit der Verteilung von der Q^2 -Skala liegt an der im Wesentlichen fehlenden Kopplung der Valenzquarks an die QCD-Dynamik der Gluonen. Dieses Verhalten kann sehr gut durch Standardmodell-Rechnungen unter Verwendung der bei ZEUS gemessenen Partondichteverteilungen beschrieben werden.

Mit dem Einbau von Spinrotatoren für HERA II eröffnen sich einmalige Möglichkeiten, hochenergetische Streuung am Proton mit longitudinal polarisierten Elektronen oder Positronen durchzuführen. In Abhängigkeit von der Ausrichtung der Elektronenpolarisation (mit oder entgegen der Strahlrichtung) werden vom Standardmodell dramatische Änderungen des ep-Wirkungsquerschnitts erwartet, die der Verletzung der Spiegelsymmetrie der schwachen Wechselwirkung folgen.

Streuprozesse mit geladenem Strom

In ep-Kollisionen bleibt das Elektron im Streuprozess erhalten, wenn das Austauscheteilchen neutral ist (Photon, Z-Boson). Im Fall eines ausgetauschten geladenen W^\pm -Bosons konvertiert das Elektron (Positron) in ein Neutrino (Anti-Neutrino), das sich im Endzustand nur durch das Fehlen von Energie nachweisen lässt. Da W-Bosonen wie ihre neutralen Verwandten, die Z-Bosonen, zu den Trägern der schwachen Kraft gehören, reagieren sie sehr unterschiedlich, je nachdem, ob sie mit einem Teilchen oder aber mit einem Anti-Teilchen wechselwirken. Dieses unsymmetrische Verhalten der W-Bosonen und die Bedingung, dass die Ladung im Streuprozess erhalten bleiben muss, ergeben die einzigartige Möglichkeit, spezifische Quarksorten einzeln zu untersuchen und empfindliche Tests des Standardmodells durchzuführen.

Die Elektronenstrahl-Daten der Jahre 1998–1999 analysierte die ZEUS-Kollaboration in Hinblick auf diese typische Ereignisklasse, $e^-p \rightarrow \nu_e X$. Die im Vergleich zu den Elektronenstrahl-Daten der Jahre 1995–1996 etwa zwanzigfache Datenmenge erlaubte wesentlich

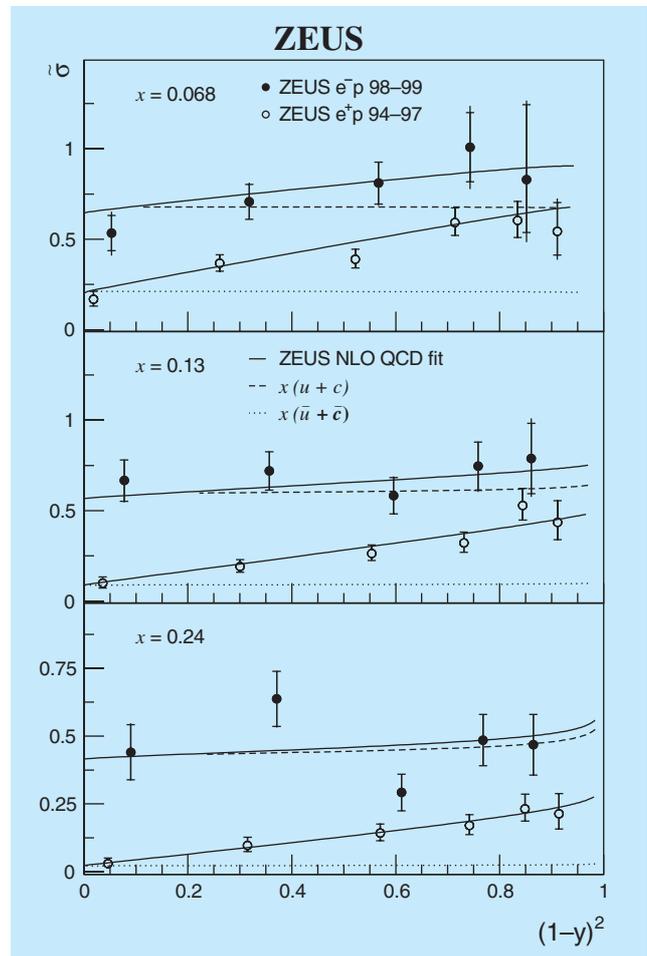


Abbildung 27: Für drei ausgewählte Protonimpulsanteile x wird die Entwicklung der reduzierten $e^\pm p$ -Streuquerschnitte in Abhängigkeit von der Variablen $(1-y)^2$ dargestellt. Die ZEUS-Daten können sehr gut durch die Erwartungen des Standardmodells unter Verwendung der bei ZEUS gemessenen Partondichteverteilungen beschrieben werden. Die $e^+ p$ -Daten wurden bereits im Jahr 2000 publiziert.

verbesserte Messungen der Abhängigkeiten des differentiellen Streuquerschnitts von der Q^2 -Skala, dem Protonimpulsanteil x und der Inelastizitäts-Variablen y , die ein Maß für die Energie des ausgetauschten Bosons ist.

Abbildung 27 zeigt die ZEUS-Messungen der reduzierten Wirkungsquerschnitte der durch den Austausch ei-

nes W-Bosons vermittelten tiefinelastischen Elektron-Proton- sowie Positron-Proton-Streuung. Diese Darstellung der von allen anderen bekannten Abhängigkeiten befreiten (reduzierten) Streuquerschnitte in Abhängigkeit von der Variablen $(1 - y)^2$ ist hierbei besonders geschickt, da fast direkt die Impulsverteilung bestimmter Quarksorten abgelesen werden kann. Für sehr kleine $(1 - y)$ -Werte (stark unelastischer Streuprozess und große Energie des W-Bosons) wird bei Verwendung des Elektronenstrahls die u-Quark-Verteilung und bei Verwendung des Positronenstrahls die Anti-u-Quark-Verteilung gemessen. Mit steigenden $(1 - y)$ -Werten wird durch die geringere Energie des W-Bosons der Streuprozess elastischer, und die Beiträge der Anti-d-Quarks für Elektronstreuung bzw. der d-Quarks für Positronstreuung nehmen sichtbar zu. Eine weitere Überprüfung dieses Verhaltens für fest gewählte Protonimpulsanteile x weist wiederum auf das Anwachsen der Partondichten hin; je kleiner x wird, umso mehr Partonen verteilt sich der Protonimpuls. Durch die Empfindlichkeit auf die einzelnen Anti-Quark-Verteilungen liefern diese Messungen komplementäre Informationen zu der Proton-Strukturfunktion F_2^{em} , die die Summe von Quark- und Anti-Quark-Verteilungen misst.

Die ZEUS-Kollaboration führte eine Anpassung der Vorhersage der elektroschwachen Theorie an den in Q^2 differentiellen Wirkungsquerschnitt der e^-p -Daten durch, wobei die Masse des W-Bosons als einziger freier Parameter gewählt wurde. Trotz der geringeren Menge der e^-p -Daten im Vergleich zu den e^+p -Daten ist die W-Boson-Masse mit der vorgelegten Analyse mit verbesserter Genauigkeit bestimmt worden,

$$M_W = 80.3 \pm 2.1(\text{stat}) \pm 1.2(\text{syst}) \pm 1.0(\text{PDF}).$$

Die Ursache hierfür ist, dass der e^-p -Wechselwirkungsquerschnitt aufgrund der dominanten Streuung am u-Quark wesentlich größer als im Fall von e^+p ist und das Proton zudem aus zwei u-Quarks und nur einem d-Quark besteht. Des Weiteren ist die u-Quark-Verteilung des Protons bisher besser bekannt als die d-Quark-Verteilung und daraus resultierende Unsicherheiten (PDF) sind kleiner.

Die ZEUS-Resultate für die W-Boson-Masse befinden sich in guter Übereinstimmung mit den präziseren Werten aus e^+e^- -Streuxperimenten.

Suche nach spezifischen Quarksorten

Ein großer Teil der Wechselwirkungen bei HERA erfolgt über die Kollision eines vom Elektron oder Positron emittierten Photons mit einem der Bausteine des Protons. Dabei wird das Photon in der Regel als punktförmiges Teilchen betrachtet, während sich das Proton aus drei Valenzquarks (zwei u-Quarks und einem d-Quark) aufbaut, die durch den Austausch von Gluonen zusammengehalten werden. Gluonen können sich allerdings für kurze Zeiten in Quark-Antiquark-Paare aufspalten und auf diese Weise den so genannten Quark-See erzeugen. Die dafür benötigte Energie „borgen“ sie sich gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation aus. Diese Energie ist um so höher und die damit verbundene Zeitskala um so kürzer, je größer die Masse der bei der Aufspaltung produzierten Quarks ist. Am häufigsten spalten sich daher die Gluonen in Paare leichter Quarks auf ($u\bar{u}$ oder $d\bar{d}$ -Paare), die im Prinzip für viele Rechnungen als masselos angesehen werden können. Die Aufspaltung in Paare schwerer Quarks (c,b,t) ist dagegen relativ selten, kann jedoch aufgrund der großen Masse dieser Quarks im Rahmen der QCD-Störungstheorie beschrieben werden. Eine Sonderstellung nimmt die Aufspaltung in $s\bar{s}$ -Paare ein. Da das s-Quark etwa hundertmal schwerer ist als zum Beispiel das u-Quark, wird seine Paar-Fluktuationsrate bereits merkbar unterdrückt. Allerdings ist seine Masse noch nicht groß genug, um diese Fluktuationsrate direkt berechenbar zu machen. Das macht die Suche nach dem s-Quark so anspruchsvoll und spannend.

Die Genauigkeit der Messungen bei ZEUS erlaubt es, Paar-Fluktuationen im Proton getrennt nach spezifischen Quarksorten aufzulösen und insbesondere den noch wenig bekannten Beitrag der $s\bar{s}$ -Paare experimentell zu bestimmen. Dies geschieht zum Beispiel durch den Nachweis eines gebundenen $s\bar{s}$ -Paares, des ϕ -Mesons, im Endzustand des Streuprozesses. Die für die Messauflösung erforderliche kurze Zeitskala wird durch die Forderung nach der Wechselwirkung eines Photons mit hoher Virtualität (großem Q^2) garantiert. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, die ϕ -Mesonen, die s-Quarks aus dem Proton-See in sich tragen, von den ϕ -Mesonen zu unterscheiden, die erst später während der so genannten Fragmentation des Endzustandes entstehen. Um diesen Untergrund-Beitrag von ϕ -Mesonen abzuschätzen, bei denen keines der beiden s-Quarks aus dem Proton-See stammt, untersuchte die ZEUS-

Kollaboration auch die kinematischen Bereiche, zu denen Seequarks in der Regel nicht beitragen sollten. Die Messung in dem kinematischen Bereich, in dem es relativ wahrscheinlich ist, dass mindestens eines der beiden s-Quarks aus dem ursprünglichen Proton-See stammt, zeigt, dass $s\bar{s}$ -Paare mit einer Rate zum Quark-See beitragen, die mit unserem derzeitigen Wissen über das s-Quark kompatibel ist. Der ZEUS-Kollaboration gelang damit der erste direkte Nachweis bei HERA, dass im Proton-See s-Quarks existieren.

Quark-Antiquark-Paare können nicht nur bei der Aufspaltung eines Gluons, sondern ebenfalls durch die Fluktuation des an der Wechselwirkung teilnehmenden Photons entstehen. In einem besonders interessanten Spezialfall stabilisiert sich das normalerweise nur kurzlebige Quark-Antiquark-Paar durch den Austausch eines so genannten Pomerons mit dem Proton und formt einen gebundenen neutralen Meson-Zustand, der durch seine Zerfallsprodukte identifiziert werden kann. Diese Zerfallsprodukte erscheinen im Detektor räumlich deutlich getrennt von anderen Teilchenbündeln des Endzustandes und liefern daher eine besonders einfache Signatur. Die Masse und der Zerfallsmodus des Mesons erlauben dabei Rückschlüsse auf die Quarksorte, die bei der ursprünglichen Photon-Fluktuation erzeugt worden ist. Die ZEUS-Kollaboration untersuchte, basierend auf der integrierten Luminosität von 25 pb^{-1} der Jahre 1995–1996, insbesondere Ereignisse, bei denen ρ ($u\bar{u}$, $d\bar{d}$), ϕ ($s\bar{s}$) oder J/ψ ($c\bar{c}$) Mesonen erzeugt werden. Diese so genannten Vektormesonen können von ihren Quantenzahlen her im Prinzip als schwere Verwandte des Photons betrachtet werden. Die ZEUS-Messungen konnten einen ersten Hinweis erbringen, dass bei der Produktion von Vektormesonen unter großen Winkeln zur Strahlachse eine harte Skala existiert, die diese Prozesse im Rahmen der QCD-Störungstheorie berechenbar macht. Diese Skala wird durch hohe Werte der Variablen $-t$ geliefert, wobei $-t$ den quadrierten Impulsübertrag vom Proton zum Protonrest beschreibt.

Abbildung 28 zeigt die gute Übereinstimmung der ZEUS-Messungen in allen drei Fällen mit den QCD-Vorhersagen. Dies ist sowohl ein Test des zugrunde liegenden QCD-Modells für den Pomeron-Austausch, als auch der Fluktuationswahrscheinlichkeit des Photons in die jeweilige Quarksorte.

Mesonen mit schwereren Quarks, wie das J/ψ -Meson, nehmen unter den Vektormesonen eine Sonderstellung

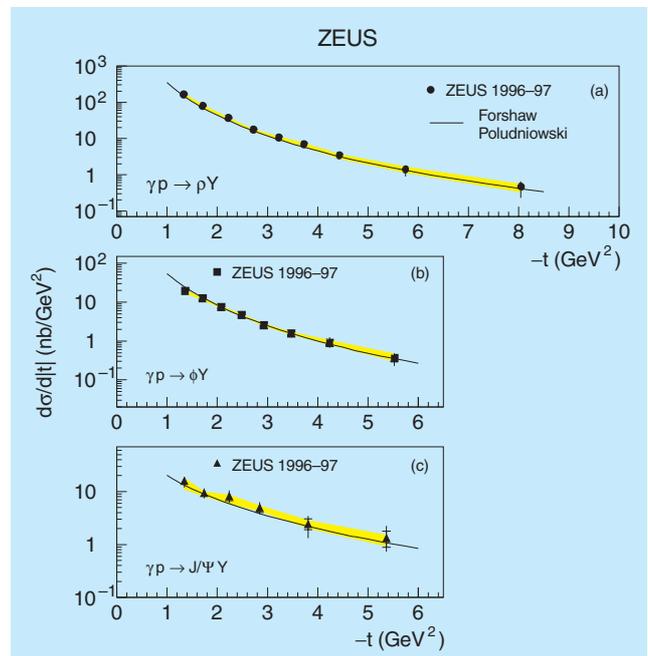


Abbildung 28: Die differentiellen Streuquerschnitte für die Vektormeson-Produktion von (a) ρ , (b) ϕ und (c) J/ψ als Funktion von $-t$ können gut durch Rechnungen der QCD-Störungstheorie (Linien) modelliert werden.

ein, da zum Beispiel die große c-Quark-Masse auch dann eine harte Skala garantiert, wenn die Streuung nicht unter großen Winkeln erfolgt. Die Untersuchung der J/ψ -Produktionsrate konnte daher auf alle entsprechenden Ereignisse ohne Winkeleinschränkung erweitert werden. Diese ZEUS-Messung ist in Abbildung 29 dargestellt. Der starke Anstieg der J/ψ -Produktion mit wachsender Schwerpunktsenergie des Proton-Photon-Systems kann als ein Maß für die Zunahme der Anzahl der Gluonen im Proton verstanden werden, die zum Pomeron-Austausch beitragen.

Eine ähnliche Untersuchung kann mit Ereignissen der so genannten offenen charm-Produktion durchgeführt werden, bei der das Photon in einen ungebundenen $c\bar{c}$ -Paar Zustand fluktuiert. Die Forderung nach einem Pomeron-Austausch, das heißt deutliche räumliche Trennung von den produzierten Teilchenbündeln, soll dabei aufrechterhalten bleiben. Die c-Quarks fragmentieren dann oft in D^* -Mesonen, die aufgrund ihrer Zerfallscharakteristik gut nachgewiesen werden können. Zur Festlegung einer kurzen Zeitskala wird eine große Q^2 -Skala gefordert. Die ZEUS-Messung des D^* -

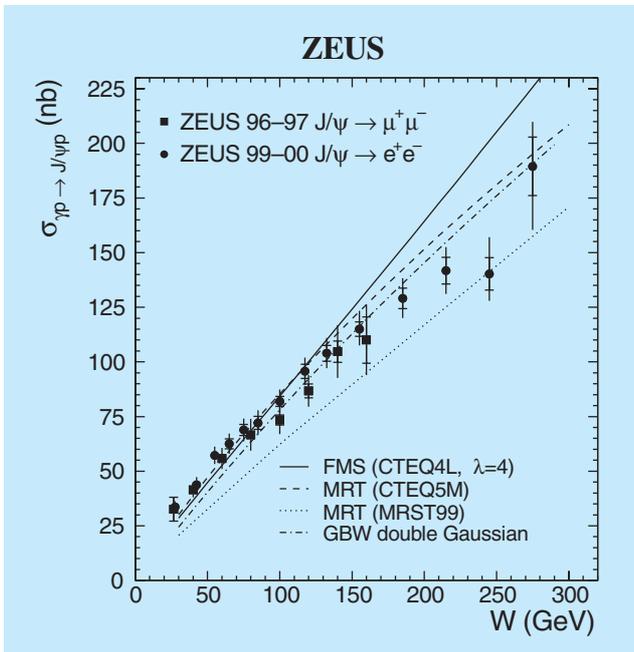


Abbildung 29: Wirkungsquerschnitt der J/ψ -Produktion in Abhängigkeit von der Photon-Proton-Schwerpunktsenergie W . Neben den ZEUS-Daten sind auch mehrere QCD-Vorhersagen (Kurven) dargestellt.

Wirkungsquerschnitts als Funktion verschiedener kinematischer Variablen erlaubte wiederum die Messung des Gluon-Beitrags zum Pomeron-Austausch, oder alternativ den Test von Modellen, in denen dieser Austausch durch QCD-Fluktuationen im Photon parametrisiert wird. Die vorhandenen Daten werden durch QCD-inspirierte Modelle am besten beschrieben.

Auch die inklusive Produktion schwerer Quarks ohne die Forderung nach einem Pomeron-austausch ist als Test der QCD sehr interessant, da die Quarkmasse hier in jedem Fall eine brauchbare harte Skala liefert. Hierzu wurde von der ZEUS-Kollaboration insbesondere die unelastische Produktion von J/ψ und ψ' -Mesonen in Photoproduktion untersucht.

Die Produktionsrate und der Anteil der Energie des J/ψ -Teilchens an der Gesamtenergie der Wechselwirkung hängen empfindlich davon ab, ob der farblose gebundene $c\bar{c}$ -Zustand direkt aus der harten Wechselwirkung hervorgeht („Colour Singlet“) oder zunächst ein farbhafter Zwischenzustand entsteht, der erst durch Fragmentation in den farblosen gebundenen Zustand über-

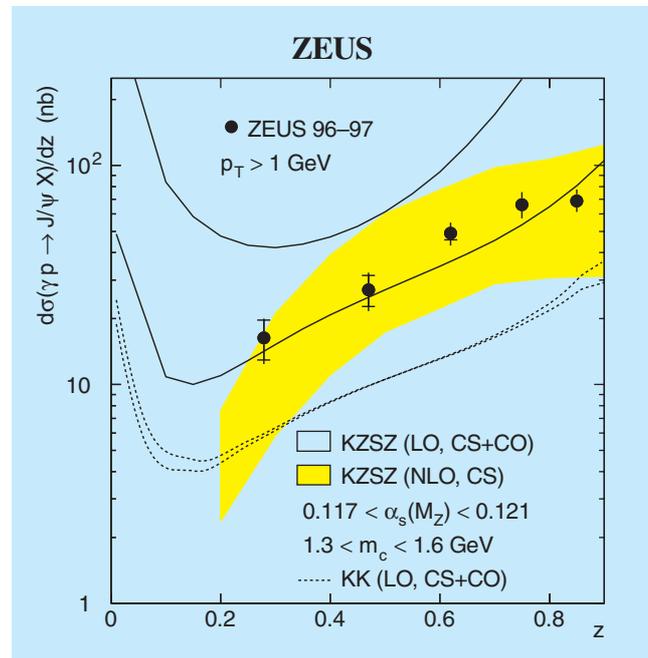


Abbildung 30: Wirkungsquerschnitt für die inklusive Produktion von J/ψ -Mesonen in Photon-Proton-Kollisionen als Funktion von z , dem Anteil des J/ψ an der vom Photon übertragenen Gesamtenergie. Ebenfalls dargestellt sind die Vorhersagen zweier „Colour Octet“ Modelle in führender Ordnung (LO, CS+CO), und die Vorhersage eines „Colour Singlet“ Modells in nächstführender Ordnung (NLO, CS) der QCD-Störungstheorie.

geht („Colour Octet“). Die ZEUS-Daten deuten darauf hin, dass der „Colour Singlet“ Beitrag allein bereits ausreicht, um die gemessenen Ereignisverteilungen zu erklären (Abb. 30).

Ein altes Modell in neuem Licht

Während die QCD-Störungstheorie sehr erfolgreich das Verhalten der Partonen für kurze Abstände, gemessen in Bruchteilen des Protondurchmessers, beschreiben kann, ist es bisher nicht möglich, das langreichweitige Wirken der starken Kraft auf Skalen des Protondurchmessers exakt mathematisch zu formulieren. Prozesse wie die Produktion von stark vorwärts-gestreuten, energiereichen Protonen und Neutronen können hier entscheidende Hinweise auf den Zusammenhang zwischen

lang- und kurzreichweitigen Korrelationen zwischen den Partonen liefern.

Die ZEUS-Kollaboration hat die semi-inklusive Neutron-Produktion, $ep \rightarrow eXn$, mit den Positronenstrahl-Daten der Jahre 1995–1997 untersucht, wobei das gestreute Neutron mit Hilfe des Vorwärts-Neutronkalorimeters (FNC) nachgewiesen wurde. Die im Streuprozess erzeugten energiereichen Neutronen haben nur einen sehr kleinen Transversalimpuls, der mit langreichweitigen Parton-Wechselwirkungen korreliert ist. Diese kann man sich mit Hilfe eines alten, vor der Entdeckung der Quarks entwickelten Modells veranschaulichen, in dem das Proton als von einer Wolke aus leichten Mesonen, vor allem Pionen, umgeben betrachtet wird. In einer speziellen Version dieses Modells besteht das Proton „im Kern“ aus einem Neutron, das in eine Wolke aus Pionen gehüllt ist. Gelingt es, nach dem ep -Streuprozess das Neutron nachzuweisen, das streng der Richtung des einfallenden Protonenstrahls folgt (Vorwärts-Richtung), so ist das ein indirekter Hinweis auf eine Wechselwirkung des HERA-Positrons mit den Pionen aus der Pionwolke. Diesen Zusammenhang nutzend, hat die ZEUS-Kollaboration die partonische Struktur des Pions untersucht. Trotz des indirekten Zugangs sind solche Studien sehr wichtig, da direkte hochenergetische Positron (Elektron) Pion-Streuxperimente bisher nicht durchführbar sind.

Die ZEUS-Messung der Strukturfunktion des Pions erfolgte im Rahmen des Ein-Pion-Austauschmodells, das die direkte Neutron-Produktion bei HERA gut beschreibt. Die Strukturfunktion des Pions zeigt bemerkenswerte Ähnlichkeiten in ihren kinematischen Abhängigkeiten mit der Strukturfunktion des Protons. Diese Beobachtung wird in Abbildung 31 veranschaulicht.

Die ZEUS-Daten können die Form der Pion-Strukturfunktion insbesondere für kleine Anteile des Pions am Protonimpuls, $x < 0.01$, weiter einschränken und belegen, dass Pion und Proton im Wesentlichen dieselbe Zusammensetzung aus Quark-Antiquark-Paaren haben.

Die Produktion eines energiereichen Protons in Protonenstrahlrichtung in der Reaktion $e^+p \rightarrow e^+Xp$ hat die ZEUS-Kollaboration mit den Daten der Jahre

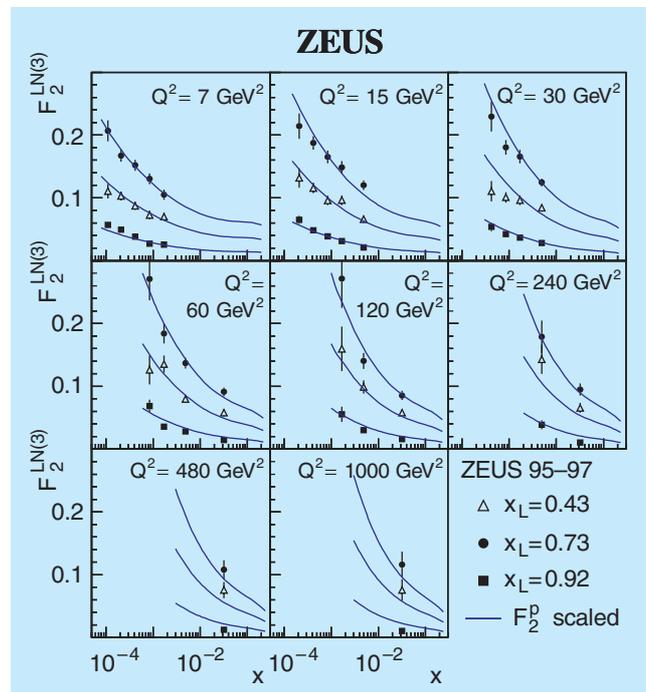


Abbildung 31: Die Struktur des Pions kann im Wesentlichen durch die Quark- und Antiquark-Verteilungen des Protons beschrieben werden, wenn diese entsprechend skaliert werden (Kurven). Die Variable x_L beschreibt den Anteil am Protonimpuls, der im Streuprozess auf das Neutron übertragen wird.

1994–1995 untersucht. Der Impulsanteil des gestreuten Protons x_L wurde hierbei mit dem Vorwärts-Protonenspektrometer (LPS) bestimmt. Die ZEUS-Messung zeigt, dass in etwa 13% der Positron-Proton-Kollisionen das gestreute Proton 3–40% seiner ursprünglichen Energie verloren hat. Bemerkenswert ist insbesondere die Beobachtung, dass der Anteil stark vorwärts gestreuter Protonen im Wesentlichen unabhängig ist von der Härte des Streuprozesses und damit von den Eigenschaften des ausgetauschten Photons. Die ZEUS-Daten ergänzen damit ähnliche Messungen in Proton-Proton-Kollisionen.

Im Prinzip können auch diese Daten Auskunft über die Zusammensetzung der Mesonwolke geben, die das Proton umgibt. Dieser Prozess ist jedoch wesentlich schwerer zu modellieren, da Beiträge von Pionen gering sind und im Wesentlichen die nicht-pionische Struktur der Mesonwolke getestet wird.

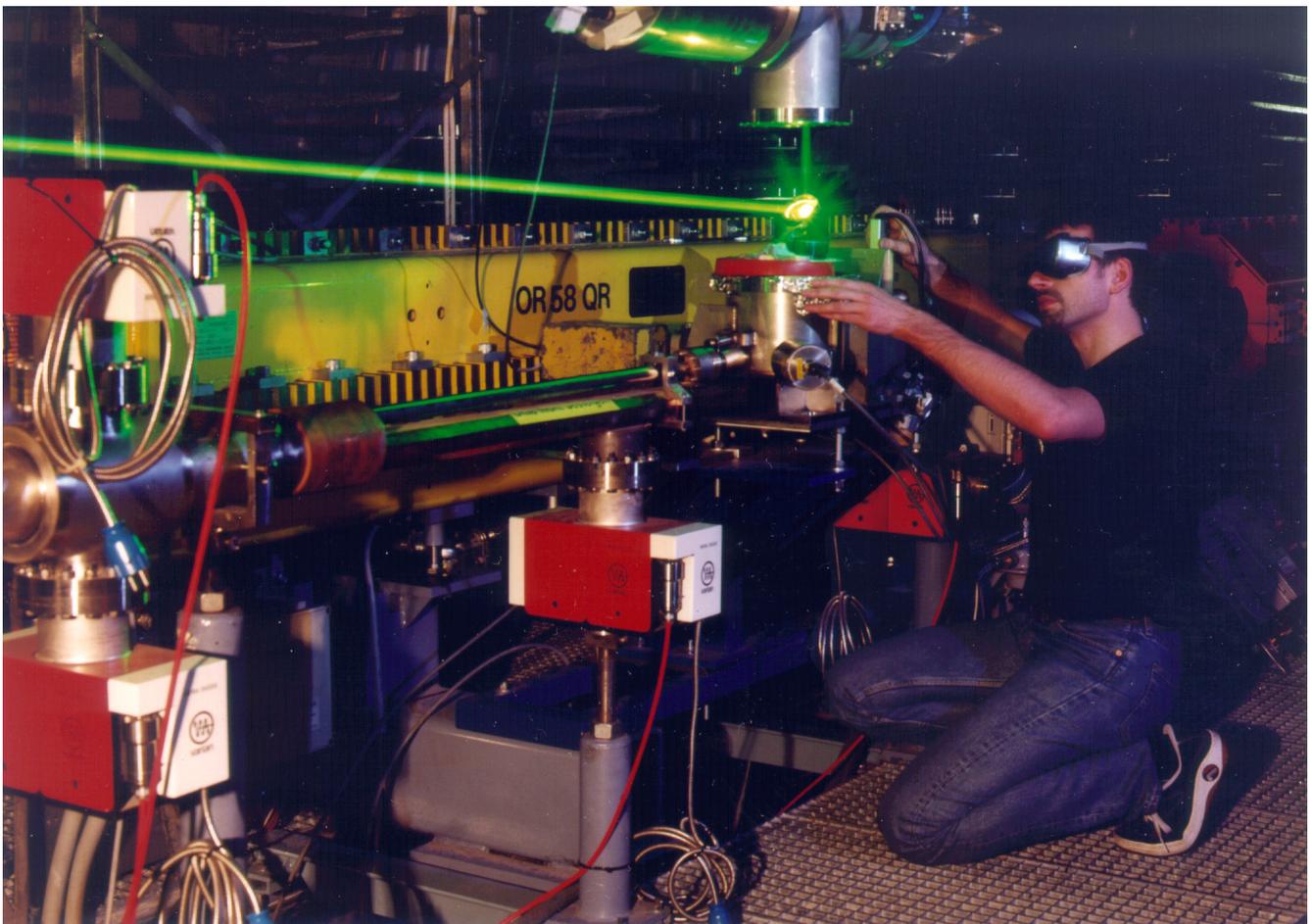


Abbildung 32: Laserstrahl des longitudinalen Polarimeters bei HERMES während Justierungsarbeiten.

HERMES-Experiment

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

Sprecher: D. Ryckbosch, Univ. Gent

Trotz der schwierigen Inbetriebnahme von HERA im Jahre 2002 konnte HERMES mit dem transversal polarisierten Wasserstofftarget Daten nehmen. Dies soll auch im nächsten Jahr der Schwerpunkt der HERMES-Datennahme sein, um erstmals die Verteilungsfunktion von transversal polarisierten Quarks im Proton zu bestimmen.

Das wichtigste Ergebnis der Analyse der bis zum Jahre 2000 mit longitudinal polarisierten Protonen und Deuteronen genommenen Daten ist die erstmalige getrennte Bestimmung der Helizitätsverteilung für fünf Quarksorten (up, down, anti-up, anti-down und strange Quarks).

Die HERMES Daten an polarisierten Deuteronen erlauben die Bestimmung der bisher unbekanntenen Tensor-Strukturfunktion b_1 . Sie ermöglicht es, zu bestimmen, in wie weit ein Deuteron sich von einer einfachen Superposition eines Protons und eines Neutrons unterscheidet.

Die Untersuchung von exklusiven Prozessen wurde fortgeführt. Sie erlauben die Bestimmung der verallgemeinerten Partonverteilungsfunktionen. Zwei Kanäle wurden von HERMES speziell untersucht: die Produktion von reellen Photonen (Tief-Virtuelle Compton Streuung) und die Produktion von einzelnen geladenen Pionen.

Um exklusive Prozesse noch genauer untersuchen zu können, soll das HERMES-Spektrometer durch

einen Detektor zum Nachweis und zur Identifizierung der langsamen Rückstoßprotonen erweitert werden. Der Vorschlag wurde im Mai 2002 vom PRC (Physics Research Committee) empfohlen. Mit Entwicklung, Konstruktion und Bau dieses Detektors wurde 2001 begonnen.

Physikalische Ergebnisse

Polarisierte Targets

Die Messung der Deuteron-Tensor-Strukturfunktion b_1 bei HERMES

In den letzten Jahren hat die HERMES-Kollaboration über die Präzisionsmessungen der spinabhängigen Strukturfunktion

$$g_1(x, Q^2) = \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 \left[q^{\vec{\uparrow}}(x, Q^2) - q^{\vec{\downarrow}}(x, Q^2) \right]$$

berichtet. $q^{\vec{\uparrow}}(x, Q^2)$ ($q^{\vec{\downarrow}}(x, Q^2)$) ist hierbei die Wahrscheinlichkeitsdichte dafür, dass der Eigendrehimpuls (Spin) eines Quarks vom Typ q parallel (antiparallel) zum Spin des Nukleons ausgerichtet ist. Diese Verteilungen hängen von den Größen Bjorken- x und Q^2

ab. Etwas vereinfacht gibt x den Impulsbruchteil an, welchen die Quarks am Gesamtimpuls des Nukleons tragen. Die Skala Q^2 ist ein Maß für das räumliche Auflösungsvermögen des virtuellen Photons: je höher der Wert von Q^2 , umso kleinere Details können in der tiefunelastischen Lepton-Nukleon Streuung aufgelöst werden. Zur Messung der longitudinalen Strukturfunktion $g_1(x, Q^2)$ wurden (in Bezug auf die Strahlrichtung) longitudinal polarisierte Elektronen bzw. Positronen an longitudinal polarisierten atomaren Wasserstoff- und Deuterium-Gastargets gestreut.

Die Kernbausteine Proton und Neutron sind Spin-1/2 Teilchen. Bezüglich einer Vorzugsrichtung sind nur zwei Einstellungen ihres Spins möglich: Parallel ($\vec{\Rightarrow}$) mit Spinprojektion $+1/2$ (in Einheiten des Planckschen Wirkungsquantums \hbar) oder antiparallel ($\vec{\Leftarrow}$) mit Spinprojektion $-1/2$. Die Polarisation eines Ensembles solcher Teilchen bezeichnet man als Vektorpolarisation; sie ist definiert als die Differenz der Teilchenzahlen in den Zuständen ($\vec{\Rightarrow}$) und ($\vec{\Leftarrow}$), geteilt durch ihre Summe, und kann Werte zwischen $+1$ und -1 annehmen.

Das Deuteron besteht aus einem Proton und einem Neutron, die nur schwach gebunden sind. Die Spins von Proton und Neutron sind parallel ausgerichtet, so dass das Deuteron Spin 1 hat. Bei einem Spin-1 Teilchen kann der Spin nicht nur parallel und antiparallel sondern auch senkrecht bezüglich einer Vorzugsrichtung ausgerichtet sein.

Als zusätzliche Größe zur Beschreibung eines Ensembles von Spin-1 Teilchen benötigt man die so genannte Tensorpolarisation. Diese vergleicht die Anzahl der Teilchen, deren Spinprojektion auf die Vorzugsrichtung verschwindet ($\uparrow\Rightarrow$), mit der Summe der Teilchen in den Zuständen ($\vec{\Rightarrow}$) und ($\vec{\Leftarrow}$). Die Tensorpolarisation kann Werte zwischen $+1$ und -2 annehmen.

Tensorpolarisierte Targets erlauben den Zugang zu einer weiteren Strukturfunktion, die als Tensor-Strukturfunktion $b_1(x)$ bezeichnet wird. Sie ist gegeben durch

$$b_1(x) = \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 \left[2q^{\uparrow\Rightarrow}(x) - \left[q^{\vec{\Rightarrow}}(x) + q^{\vec{\Leftarrow}}(x) \right] \right].$$

Hierbei ist $q^{\uparrow\Rightarrow}(x)$ die Wahrscheinlichkeitsdichte der Quarks mit Spinrichtung senkrecht zu der des Kerns.

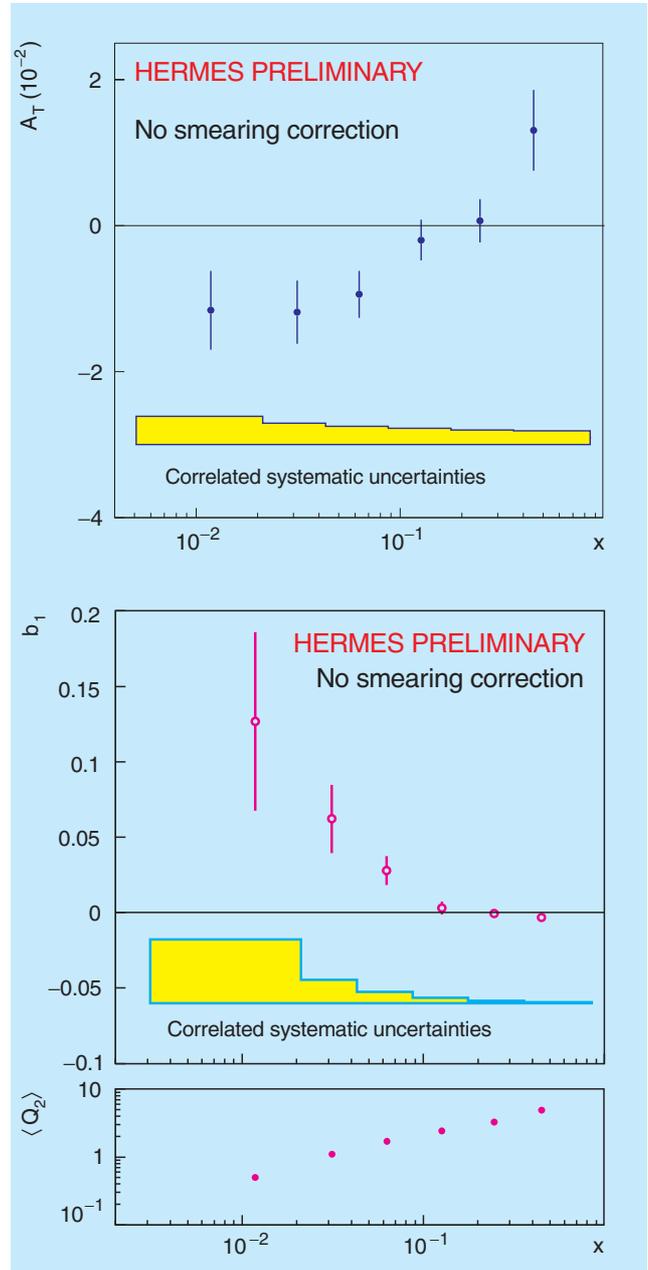


Abbildung 33: Die von HERMES gemessene Tensor-Asymmetrie $A_T(x)$ und die daraus extrahierte Tensor-Strukturfunktion $b_1(x)$.

Die Strukturfunktion $b_1(x)$ ist ein Maß dafür, wie stark das Deuteron von einem trivial gebundenen Zustand aus Proton und Neutron abweicht und wird zum Beispiel auf einen doppelten Pionen-Austausch zurück-

geführt. $b_1(x)$ hat eine ähnlich fundamentale Bedeutung wie das elektrische Quadrupolmoment des Deuterons.

Diese Strukturfunktion des Deuterons war bisher experimentell völlig unbekannt, da sie nur mit einem polarisierten Gastarget, wie es HERMES verwendet, gemessen werden kann. Bei einem solchen Target können die verschiedenen Spinzustände des Deuterons bzw. Kombinationen davon einzeln ausgewählt werden, und eine hohe Tensorpolarisation kann bei gleichzeitig verschwindender Vektorpolarisation erzeugt werden.

Zur weltweit erstmaligen Bestimmung der Strukturfunktion $b_1(x)$ wurde im Jahre 2000 das mit atomarem gasförmigen Deuterium gefüllte HERMES-Target während einer sechswöchigen dedizierten Datennahmeperiode in einem speziellen Modus betrieben, in dem zwischen Injektionen von verschiedenen vektor- und tensorpolarisierten Zuständen abgewechselt wurde. Es wurden Asymmetrien in den Wirkungsquerschnitten für die verschiedenen Polarisationszustände des Targets ermittelt. Die so erhaltene Tensor-Asymmetrie A_T ist klein, im Bereich von wenigen Prozent. Der Verlauf dieser Asymmetrie ist im oberen Teil von Abbildung 33 als Funktion der Bjorken-Variablen x gezeigt.

Aus der Tensorasymmetrie kann man direkt auf die Tensor-Strukturfunktion $b_1(x)$ schließen. Die HERMES-Ergebnisse (Abb. 33 unten) zeigen, dass $b_1(x)$ relativ groß ist und im Bereich von 10^{-1} liegt. Dieses Resultat stimmt gut mit neueren theoretischen Modellrechnungen überein.

Quark-Helizitätsverteilungen

Die Helizitätsverteilung $\Delta q(x)$ für eine bestimmte Quarksorte $q = \underline{u}$, \underline{d} , \underline{s} , \dots gibt die Differenz der Anzahl an Quarks im Proton, deren Spin parallel ($\vec{\sigma}$) bzw. antiparallel ($\overleftarrow{\sigma}$) zum Spin des Protons steht: $\Delta q(x) = q^{\vec{\sigma}}(x) - q^{\overleftarrow{\sigma}}(x)$. Eine der zentralen Aufgabenstellungen des HERMES-Experiments ist die Messung der Helizitätsverteilungen $\Delta q(x)$ für möglichst viele, voneinander unabhängige Quark- und Antiquarksorten. Im Jahr 2002 konnte die HERMES-Kollaboration weltweit erstmalig Ergebnisse zu Helizitätsverteilungen für fünf verschiedene Sorten von Quarks und Antiquarks vorstellen.

Die Bestimmung der Helizitätsverteilungen $\Delta q(x)$ basiert auf der Messung von Asymmetrien im Wirkungsquerschnitt für die tiefunelastische Streuung der Strahlpositronen an einem Gastarget aus polarisierten Protonen und Deuteronen, deren Spin abwechselnd parallel und antiparallel zum Spin der Strahlpositronen ausgerichtet wird. Diese so genannte inklusive Wirkungsquerschnitts-Asymmetrie, bei der lediglich das gestreute Strahlpositron nachgewiesen wird, ist proportional zu einer Kombination aller Helizitätsverteilungen. Kann man zusätzlich zum gestreuten Strahlpositron ein oder mehrere Hadronen im Spektrometer nachweisen, spricht man von semi-inklusive Streueignissen. Aus der Bestimmung des Hadrontyps kann man eine Wahrscheinlichkeitsaussage treffen, welche Quarksorte im Streuprozess getroffen wurde. Für verschiedene Hadrontypen in semi-inklusive Streuprozessen ergeben sich unterschiedliche Gewichtungen der verschiedenen $\Delta q(x)$ in der Wirkungsquerschnitts-Asymmetrie.

Aus der Kombination einer ausreichenden Anzahl unterschiedlicher semi-inklusive Asymmetrien lassen sich dann die einzelnen Beiträge $\Delta q(x)$ bestimmen. Prinzipiell müssen dabei mindestens so viele unabhängige Asymmetrien gemessen werden, wie Helizitätsverteilungen ermittelt werden sollen. In der Praxis benötigt man aufgrund der begrenzten statistischen Präzision der Messergebnisse sogar eine höhere Anzahl voneinander unabhängiger Asymmetrieklassen.

Neben einer großen Akzeptanz für semi-inklusive Streueignisse verfügt das HERMES-Spektrometer über ausgezeichnete Detektoren für die Teilchenidentifikation. Insbesondere der seit 1998 betriebene RICH („Ring Imaging Cherenkov“) Detektor ermöglicht die Unterscheidung zwischen geladenen Pionen, Kaonen und Protonen und damit die Messung vieler unterschiedlicher Klassen von Streueignissen.

In Abbildung 34 sind die weltweit ersten Ergebnisse zu den Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien für die Produktion geladener Pionen und Kaonen an einem Deuteriumtarget gezeigt. Durch die Kombination dieser Asymmetrien mit entsprechenden Messungen an einem Protonentarget aus den Jahren 1996 und 1997 ist man erstmals in der Lage, die Quark-Helizitätsverteilungen $\Delta u(x)$, $\Delta d(x)$, $\Delta \bar{u}(x)$, $\Delta \bar{d}(x)$ sowie $\Delta s(x)$ unabhängig voneinander zu bestimmen.

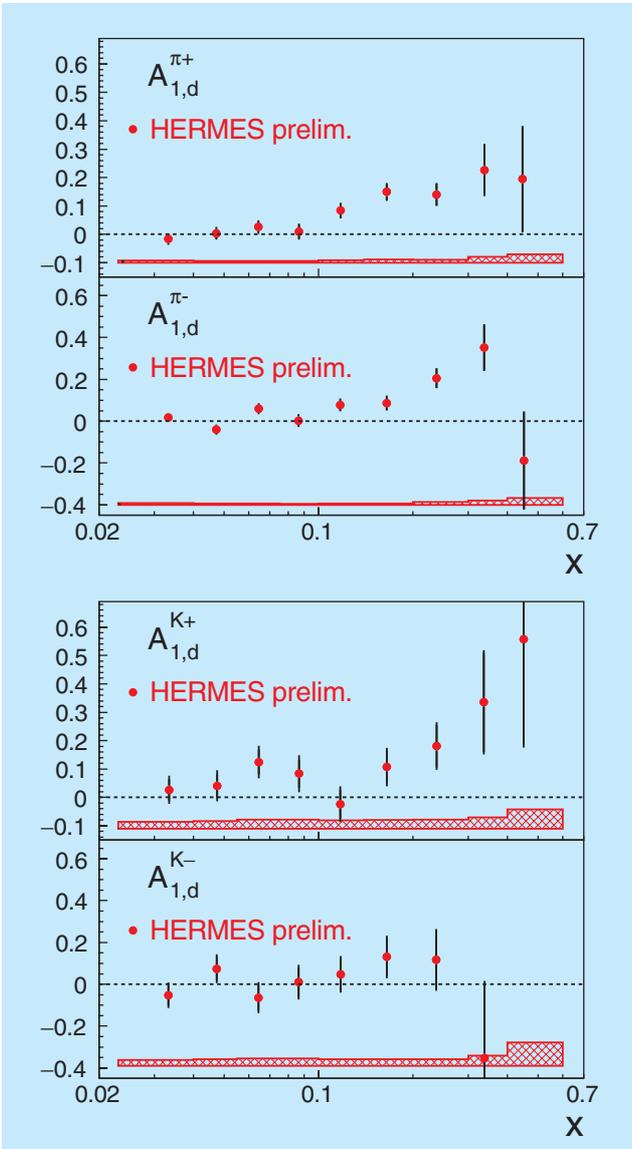


Abbildung 34: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semi-inklusiven Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien für die Produktion geladener Pionen und Kaonen an einem Deuteriumtarget. Die schraffierten Bänder geben die systematischen Messunsicherheiten an.

Abbildung 35 zeigt die vorläufigen HERMES-Resultate. Die experimentellen Ergebnisse stimmen gut mit zwei leicht unterschiedlichen Parametrisierungen überein, welche durch Anpassungen an den Welt Datensatz inklusiver Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien gewonnen wurden. Aufgrund der Beschränkung auf inklusi-

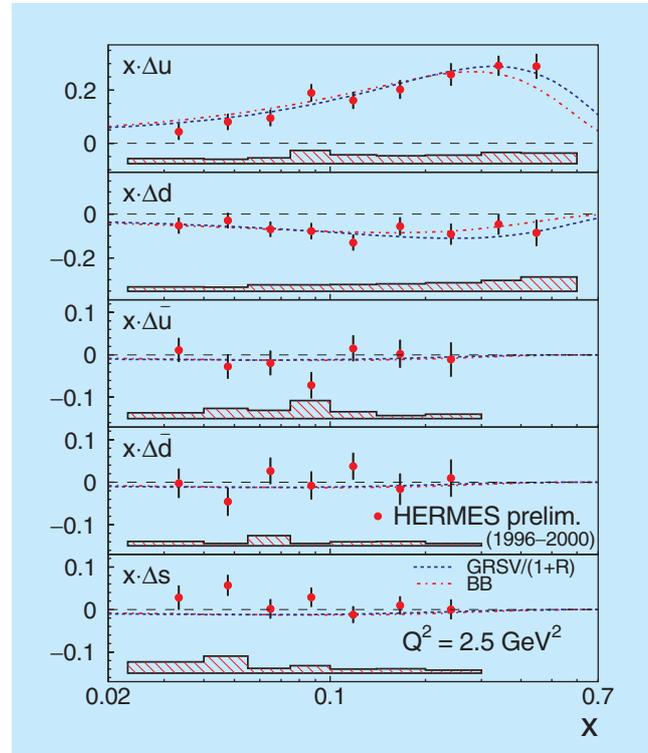


Abbildung 35: Vorläufige Ergebnisse zu den Helizitätsverteilungen $x \cdot \Delta q(x)$ für *up*- und *down*-Quarks und Antiquarks sowie für *strange*-Quarks bei einer Skala von $Q^2 = 2.5 \text{ GeV}^2$. Zum Vergleich markieren die beiden unterbrochenen Linien zwei Anpassungen an den Welt Datensatz inklusiver Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien. Die schraffierten Bänder geben die systematischen Unsicherheiten der HERMES-Resultate an.

sive Streudaten können diese Parametrisierungen jedoch nicht fünf voneinander unabhängige Helizitätsverteilungen beschreiben und müssen sich der Symmetrieannahme $\Delta \bar{u}(x) \equiv \Delta \bar{d}(x) \equiv \Delta s(x)$ bedienen. Vor allem in der unabhängigen Bestimmung der Verteilungen $\Delta \bar{u}(x)$, $\Delta \bar{d}(x)$ sowie $\Delta s(x)$ liegt die große Bedeutung der experimentellen Ergebnisse. Sowohl die direkte Bestimmung der Helizitätsverteilung für *strange*-Quarks als auch die erste Messung der Differenz zwischen den Helizitätsverteilungen für die leichten Seequarks $\Delta \bar{u}(x) - \Delta \bar{d}(x)$ sind von großem Interesse. Erste experimentelle Resultate sind in Abbildung 36 mit einigen theoretischen Modellen verglichen, welche von Null verschiedene Werte für diese Größe vorhersagen.

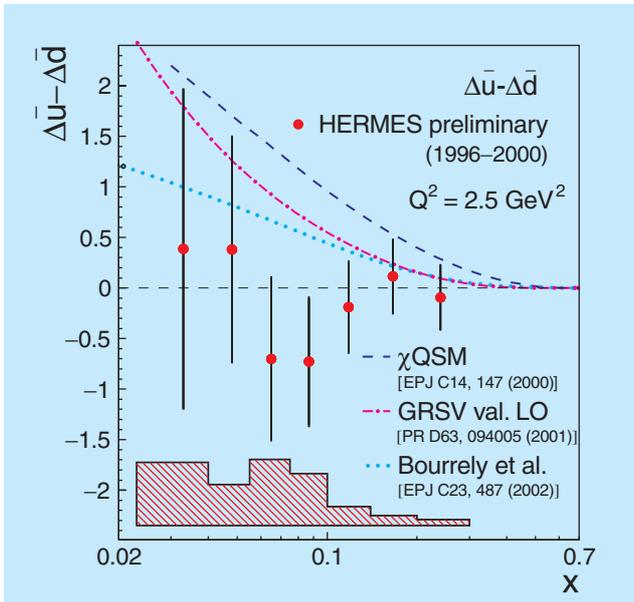


Abbildung 36: Erste Messergebnisse zur Differenzverteilung $\Delta\bar{u}(x) - \Delta\bar{d}(x)$. Das schraffierte Band gibt die experimentelle systematische Unsicherheit an, die drei unterbrochenen Kurven markieren unterschiedliche theoretische Modellvorhersagen.

Obleich diese Messergebnisse keine Symmetriebrechung zwischen den Helizitätsverteilungen der leichten Seequarksorten belegen, wird es weiterer experimenteller Anstrengungen bedürfen, um mittels verbesserter Präzision zwischen den konkurrierenden theoretischen Modellen unterscheiden zu können.

Unpolarisierte Targets

Die Strukturfunktion F_2 und die Absorption von Hadronen in Kernmaterie

Die Konstruktion des HERMES-Targets erlaubt es, statt Wasserstoff und Deuterium auch Gase schwerer Atome in die Target-Zelle einzulassen. Als Gase wurden dabei Helium, Stickstoff, Neon und Krypton benutzt. Da die Kerne dieser Gase im HERMES-Target nicht polarisiert werden können, wurde als Referenz zusätzlich unpolarisiertes Deuteriumgas vermessen.

Gemessen wurden als Funktion der Variablen x die Zählratenverhältnisse inklusiver Streueignisse an schwereren Kernen (A) relativ zu Deuterium (D). Dieses Verhältnis ist direkt proportional zum Verhältnis der Strukturfunktionen F_2^A zu F_2^D von Deuterium. Eine Abweichung von eins beweist, dass sich die Struktur des quasifreien Nukleons durch den Einfluss der starken Wechselwirkung im Atomkern verändert. Die Resultate des HERMES-Experimentes erweitern den Welt-Datensatz um eine halbe Größenordnung zu kleineren Werten von Q^2 und erlauben eine erweiterte Untersuchung der Strukturfunktionen F_2^A in Abhängigkeit von Q^2 .

Bei semi-inklusive Streuprozessen werden zusätzlich zum gestreuten Positron auch Hadronen nachgewiesen. Ähnlich wie für inklusive Streueignisse werden die Zählraten dieser Ereignisse mit schweren Kernen mit denen an Deuterium verglichen. Hierbei betrachtet man nun das Doppelzählratenverhältnis $\frac{N_A^h/N_A}{N_D^h/N_D}$, das man erhält, wenn man die Anzahl N_A^h semi-inklusive Streueignisse am Kern A geteilt durch die Anzahl inklusiver Ereignisse N_A am selben Kern durch das entsprechende Verhältnis für Deuterium dividiert. Die relevanten kinematischen Variablen sind in diesem Fall der Energietransfer ν vom Strahlpositron auf den Targetkern sowie der vom Hadron getragene Energieanteil $z = E_h/\nu$, normalisiert auf den Energietransfer.

Diese Ratenverhältnisse werden auch Absorptionsverhältnisse genannt. Beim Durchqueren der Kernmaterie kann das Hadron über die starke Wechselwirkung an den Nukleonen im Kern streuen und somit dem Nachweis im Detektor entgehen. Dieser Prozess ist um so wahrscheinlicher, je schwerer der Targetkern ist. Werte des Absorptionsverhältnisses größer als eins bedeuten hingegen, dass neben der Absorption noch andere Streuprozesse eine Rolle spielen, wie beispielsweise die Rückstreuung von Pionen an Protonen im Kern.

Durch die Hinzunahme der Informationen des RICH Detektors kann zwischen Pionen, Kaonen, Protonen und deren Antiteilchen als verschiedenen Typen von Hadronen unterschieden werden (Abb. 37). Beim Vergleich der Daten mit phänomenologischen Modellen zeigt sich, dass die errechneten Zeiten für die Hadronformation für Protonen um einen Faktor 2 größer sind als bei Mesonen. Für Krypton und Stickstoff wurde experimentell eine Abhängigkeit der Absorp-

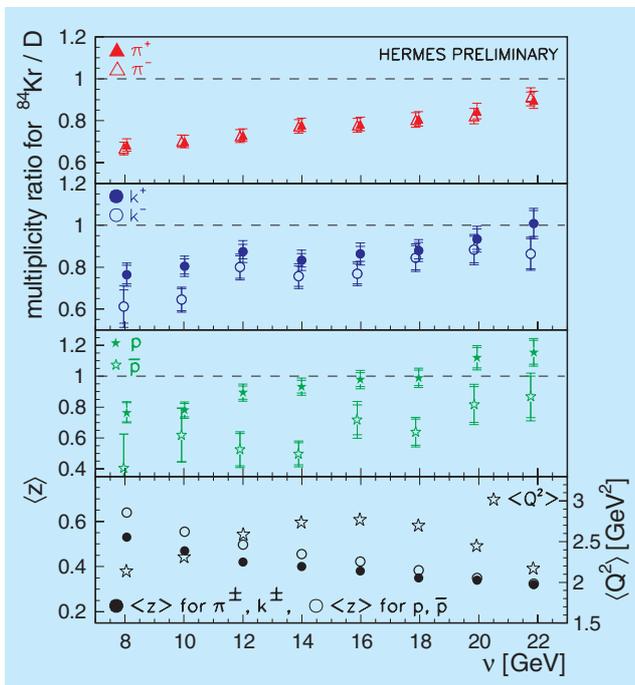


Abbildung 37: Absorptionsverhältnisse als Funktion von ν .

tion von der Kerngröße proportional zu $A^{2/3}$ beobachtet, welche nicht im Einklang mit den phänomenologischen Modellvorhersagen steht. Hingegen kann dieses Verhalten gut mit quantenchromodynamischen Modellrechnungen beschrieben werden, bei denen man dasjenige Quark betrachtet, welches das virtuelle Photon des Streuprozesses absorbiert und dann über Gluon-Bremsstrahlung und Quark-Doppelstreuung Energie verliert. Neue, bereits aufgenommene Daten an Helium und Neon werden noch genauere Studien der Absorption von Hadronen in Kernmaterie ermöglichen.

Messung der transversalen Polarisation von Λ - und $\bar{\Lambda}$ -Hyperonen in quasireeller Photoproduktion

Das Λ -Hyperon ist in der Spin-Physik ein besonders interessantes Teilchen. Im Konstituenten-Quarkmodell hat es den Quarkinhalt (uds), und sein Spin rührt ausschließlich vom Spin des s-Quarks her, während sich die Spins des u- und d-Quarks wegmitteln. Das Λ ist das leichteste Baryon mit einem s-Quark als Konsti-

tuenten und kann nur über die schwache Wechselwirkung zerfallen. Die dominierenden Zerfallskanäle sind $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ (63.9 %) und $\Lambda \rightarrow n\pi^0$ (35.8 %).

Der schwache Zerfall ist paritätsverletzend, das heißt er verletzt die Spiegelsymmetrie. Das Proton aus dem Zerfall $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ wird bevorzugt in die Richtung emittiert, in die der Spin des Λ -Teilchens zeigt. Wenn man also die Flugrichtung des Protons aus dem Zerfall bestimmt, kennt man die Spinrichtung des Λ . Präziser gesprochen bestimmt man allerdings nicht die Spinrichtung jedes einzelnen Λ -Teilchens sondern die Λ -Polarisation, die bei einem Ensemble von Teilchen die statistische Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass der Spin in eine bestimmte Richtung zeigt.

In den 70er Jahren konnte bereits demonstriert werden, dass Λ -Teilchen, die in Proton-Proton-Streueperimenten bei hohen Energien erzeugt werden, polarisiert sind, und zwar senkrecht (transversal) zu der Ebene, die aus der Richtung des einfallenden Strahls und der Richtung des erzeugten Λ gebildet wird. Die Normale \hat{n} ist gegeben durch $\hat{n} = \vec{p}_{\text{Strahl}} \times \vec{p}_{\Lambda}$. Bei Streuung in die Richtung links vom Strahl zeigte die Polarisation nach unten, bei Streuung nach rechts nach oben, das heißt jeweils entgegen der Richtung der Normalen (Abb. 38), die Λ -Teilchen haben somit eine negative transversale Polarisation.

Ähnliche Effekte werden auch mit anderen Hadronenstrahlen und bei der Erzeugung von anderen Hyperonen und Anti-Hyperonen beobachtet. Interessanterweise zeigen Λ -Teilchen, die mit Protonen- oder Pionenstrahlen erzeugt werden, immer negative transversale Polarisation, lediglich bei Strahlen mit negativen Kaonen ($K^- = (s\bar{u})$), die bereits ein s-Quark enthalten, ist die transversale Λ -Polarisation positiv.

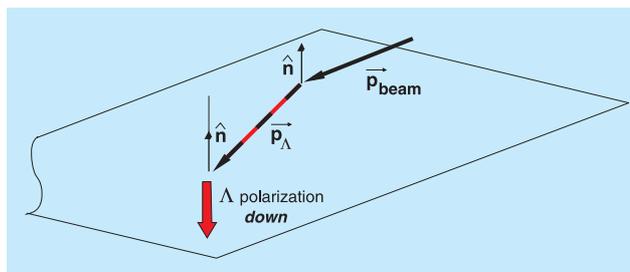


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Orientierung der Λ -Polarisation zur Strahlpolarisation.

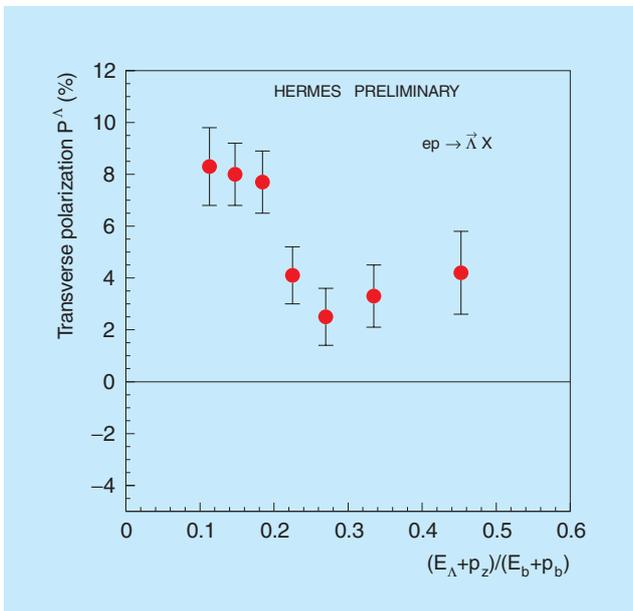


Abbildung 39: Die Λ -Polarisation in Abhängigkeit von der Variablen ζ .

In der Vergangenheit wurde eine Reihe von phänomenologischen Modellen zur Erklärung der experimentellen Daten entwickelt. Es gibt aber bisher noch kein Modell, das die ganze Vielfalt der beobachteten transversalen Polarisationen der Hyperonen und ihre kinematischen Abhängigkeiten konsistent beschreibt.

Das HERMES-Experiment hat nun zum ersten Mal auch eine transversale Polarisation bei der Erzeugung von Λ - und $\bar{\Lambda}$ -Teilchen in der Elektron-Nukleon-Streuung bei sehr kleinen Impulsüberträgen, das heißt in der quasi-reellen Photoproduktion, beobachtet. Hierbei werden im HERMES-Spektrometer nur die aus dem Λ -Zerfall entstandenen Proton-Pion-Paare nachgewiesen, nicht aber die gestreuten Elektronen, die bei der Wechselwirkung nur um sehr kleine Winkel abgelenkt werden. Die vorläufigen Resultate für die gemessenen Polarisationen sind

$$P_n^\Lambda = +5.5 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 1.6(\text{sys})\%$$

und

$$P_n^{\bar{\Lambda}} = -4.3 \pm 1.3(\text{stat}) \pm 1.2(\text{sys})\%.$$

Abbildung 39 zeigt die vorläufigen Resultate für die transversale Λ -Polarisation als Funktion der Variablen

$\zeta = (E_\Lambda + p_z)/(E_b + p_b)$. Hierbei ist p_z der Longitudinalimpuls eines Λ -Teilchens mit der Energie E_Λ , und E_b, p_b sind Energie und Impuls des Elektronenstrahls. Diese Variable ist ein Maß dafür, ob das Λ -Teilchen in Vorwärtsrichtung als Strahlfragment erzeugt wurde ($\zeta \rightarrow 1$) oder in Rückwärtsrichtung als Targetfragment ($\zeta \rightarrow 0$). Man kann zeigen, dass die Trennlinie zwischen diesen beiden Bereichen näherungsweise bei einem Wert von $\zeta = 0.25$ verläuft.

Überraschenderweise ist die gemessene transversale Λ -Polarisation positiv, im Gegensatz zu fast allen anderen Messungen in der Hadron-Nukleon-Wechselwirkung. Das gleiche positive Vorzeichen wurde lediglich in der K^- -Proton-Streuung beobachtet. Dies legt die Vermutung nahe, dass diese Polarisation möglicherweise korreliert ist mit einem Anteil von strange-Quarks im Photon, der durch die Fluktuation des Photons in $s\bar{s}$ Quark-Antiquark-Paare hervorgerufen werden kann. Bemerkenswert sind auch die Tatsachen, dass die Polarisation für kleine Werte von ζ ansteigt und für $\bar{\Lambda}$ in diesem Bereich negativ ist. Das ist ein Hinweis auf möglicherweise sehr interessante Effekte bei der bisher noch wenig untersuchten Targetfragmentation, die in den kommenden Jahren mit Hilfe des neuinstallierten Λ -Rad-Detektors detailliert untersucht werden soll.

Nachweis der Farbladungstransparenz und erste Messung des kohärenten Wirkungsquerschnittsverhältnisses in exklusiver, diffraktiver ρ^0 -Produktion

Im Folgenden wird die Untersuchung von Eigenschaften der Wechselwirkung virtueller Photonen mit Nucleonen und Atomkernen mittels exklusiver, diffraktiver Produktion von ρ^0 -Mesonen vorgestellt. Bei diesem Prozess fluktuiert das vom Strahlpositron abgestrahlte virtuelle Photon in ein Quark-Antiquark-Paar, welches dann im Kraftfeld des Nucleons ein ρ^0 -Meson bildet. Dabei bleibt das Targetnucleon intakt, und außer dem detektierten ρ^0 -Meson entstehen keine weiteren Teilchen.

Eine fundamentale Vorhersage der Quantenchromodynamik ist die Existenz der so genannten Farbladungstransparenz. Die transversale Ausdehnung von Hadronen, die in exklusiven Reaktionen gebildet werden, ist für hohe Werte des negativen Viererimpulsübertrags Q^2

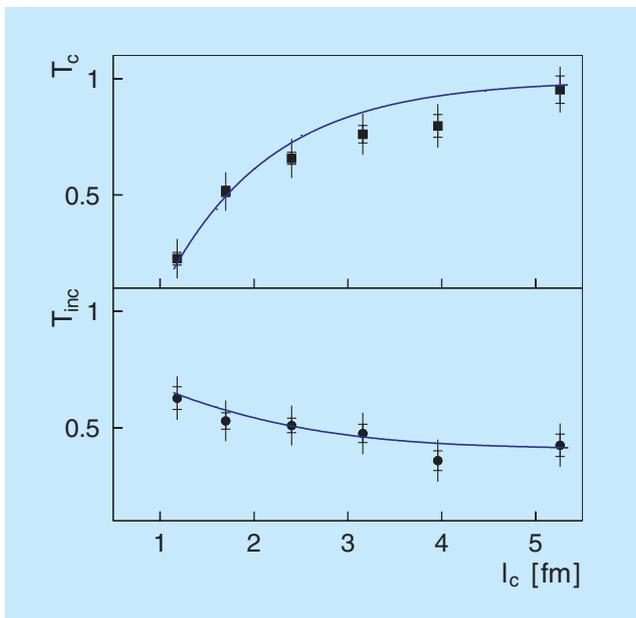


Abbildung 40: HERMES-Resultate zur Transparenz des Atomkerns als Funktion der Kohärenzlänge für kohärente (oben) und inkohärente (unten) ρ^0 -Produktion an Stickstoff verglichen mit Modellvorhersagen. Die inneren Fehlerbalken repräsentieren die statistischen Unsicherheiten, die gesamten Fehlerbalken beinhalten auch den Beitrag systematischer Unsicherheiten.

klein. Hadronen sind nach außen farbladungsneutral, man spricht von Farbsingulett Objekten. Beide Eigenschaften – die reduzierte Ausdehnung und die Farbladungsneutralität – haben zur Folge, dass Hadronen in reduziertem Maße mit dem sie umgebenden Atomkern wechselwirken.

Seit ungefähr fünfzehn Jahren sucht man nach experimentellen Belegen für die Existenz der Farbladungstransparenz, bislang allerdings ohne gemeinhin akzeptierte positive Resultate. Beim HERMES-Experiment wurde die exklusive ρ^0 -Produktion auf Signaturen für Farbladungstransparenz untersucht. Die dabei relevante physikalische Größe ist die Transparenz des Atomkerns $T_A = \sigma_A / (A \cdot \sigma_N)$, welche das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für die ρ^0 -Produktion an einem freien Nukleon (einem Proton) zu dem für die Produktion am Atomkern ist, normiert auf die Anzahl A der Nukleonen in diesem Atomkern. Eine Abweichung der Größe T_A von 1 bedeutet Unterschiede zwischen der

ρ^0 -Produktion an freien Nukleonen und zusammengesetzten Atomkernen.

Bei der ρ^0 -Produktion an Atomkernen unterscheidet man weiter zwischen zwei Prozessen: bei der inkohärenten ρ^0 -Produktion bricht der Atomkern auf oder geht in einen angeregten Zustand, bei der kohärenten ρ^0 -Produktion bleibt der gesamte Atomkern intakt. Im inkohärenten Fall ist T_A direkt mit der Wahrscheinlichkeit verknüpft, dass das produzierte ρ^0 -Meson den Atomkern intakt durchquert, für den kohärenten Fall gilt dieser einfache Zusammenhang nicht mehr.

Abbildung 40 zeigt die erste Messung der Transparenz T_A für den kohärenten Fall (T_c) zusammen mit Resultaten für den inkohärenten Fall (T_{inc}) in Abhängigkeit von der Größe $l_c = 2v / (Q^2 + M_{\rho^0}^2)$, die als Kohärenzlänge bezeichnet wird. Aufgrund von Einflüssen der Wechselwirkungen des Anfangszustands nimmt T_{inc} mit steigender Kohärenzlänge ab. Im Gegensatz dazu nimmt die Transparenz für die kohärente ρ^0 -Produktion

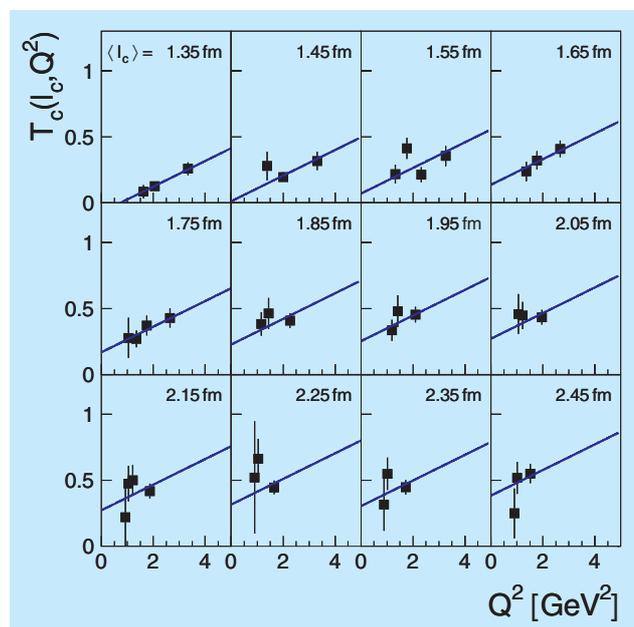


Abbildung 41: Die Transparenz des Atomkerns T_c als Funktion von Q^2 in verschiedenen Intervallen von l_c für die kohärente ρ^0 -Produktion an Stickstoff. In jedem Teilbild ist der mittlere Wert $\langle l_c \rangle$ angegeben, die Fehlerbalken repräsentieren nur die statistischen Unsicherheiten. Die Ausgleichsgeraden sind mit derselben Steigung an alle Datenpunkte angepasst.

mit steigenden Werten von l_c zu. Die experimentellen Resultate stimmen gut mit Modellrechnungen überein, die als Kurven in Abbildung 40 gezeigt sind. Die Berechnungen berücksichtigen die Effekte der Kohärenzlänge und der Farbladungstransparenz bei den unterschiedlichen Mittelwerten $\langle l_c \rangle$ und $\langle Q^2 \rangle$ in jedem experimentellen l_c -Intervall.

Das HERMES-Experiment hat die Transparenz des Atomkerns für exklusive ρ^0 -Produktion an Wasserstoff und Stickstoff in einem kinematischen Bereich $Q^2 < 4 \text{ GeV}^2$ und $1.3 \text{ fm} \leq l_c \leq 2.5 \text{ fm}$ vermessen. Um für Kohärenzlängeneffekte in der Q^2 -Abhängigkeit von T_A zu korrigieren, wählt man die Darstellung von Abbildung 41. Dabei schränkt man l_c auf sehr kleine Bereiche ein und bestimmt T_A in Abhängigkeit von Q^2 in jedem dieser Bereiche. An die so erhaltenen Werte von T_A wurde dann eine Ausgleichsgerade mit derselben positiven Steigung für alle l_c -Intervalle angepasst. Wenn man die Resultate für die kohärente und inkohärente ρ^0 -Produktion kombiniert, erhält man einen Wert der Steigung von $(0.074 \pm 0.023) \text{ GeV}^{-2}$, welcher gut mit der Vorhersage der Modellrechnung von 0.058 GeV^{-2} übereinstimmt.

Neue Detektorkomponenten

Der HERMES Rückstoßdetektor

Ein in den letzten Jahren entwickelter, neuer theoretischer Ansatz kombiniert unterschiedliche Ansätze, die Struktur des Protons zu beschreiben. In dieser Beschreibungsweise wird die vollständige Struktur des Protons durch eine Klasse von Funktionen, den generalisierten Partonverteilungen beschrieben. Bislang unzugängliche Größen, wie zum Beispiel der Bahndrehimpuls der Quarks im Proton, werden damit zugänglich.

Den theoretisch am klarsten zu interpretierenden Zugang zu dieser neuen Beschreibungsweise des Protons bietet die Messung der tief-virtuellen Comptonstreuung (DVCS). Dabei wird ein vom Lepton emittiertes virtuelles Photon vom Proton absorbiert und ein reelles Photon bildet mit dem Rückstoßproton und dem gestreuten Lepton den Endzustand: $e + p \rightarrow e' + p' + \gamma$. Der zum gleichen Endzustand führende Bethe-Heitler Prozess

interferiert mit der DVCS-Streuung, der Interferenzterm ermöglicht es, den Realteil und den Imaginärteil der DVCS-Amplitude getrennt zu studieren.

Da sowohl die Helizitätsrichtung als auch die Ladung des HERA-Leptonenstrahls geändert werden können, ist das HERMES-Experiment in der weltweit einzigartigen Lage, sowohl den Realteil als auch den Imaginärteil dieser Amplitude vermessen zu können. Die Messung kann ohne polarisiertes Target durchgeführt werden.

Bei den von der HERMES-Kollaboration bisher veröffentlichten Messungen zur DVCS wurde das Rückstoßproton nicht nachgewiesen. Die zusätzliche Messung des Rückstoßprotons aus dem DVCS-Prozess ist die wesentliche Motivation für den Einbau eines Rückstoßdetektors, da dadurch der Beitrag von nicht exklusiven Ereignissen durch Detektoreffekte wie „Smearing“ praktisch völlig unterdrückt wird. Der Rückstoßdetektor erlaubt es, außerdem einige kinematische Größen, wie den Vierer-Impuls Transfer t zum Rückstoßproton, mit höherer Auflösung zu messen. Dies ermöglicht es, die Abhängigkeit der DVCS-Amplituden von verschiedenen kinematischen Größen zu studieren und damit zwischen einzelnen Modellen der generalisierten Partonverteilungen zu unterscheiden.

Der Detektor besteht aus zwei Subsystemen zur Protonenmessung: einem Siliziumdetektor und einem Detektor aus szintillierenden Fasern. Der im Vakuum des HERA-Elektronenrings eingebaute Siliziumdetektor soll niederenergetische Protonen in einem Impulsbereich von $100\text{--}500 \text{ MeV}/c$ im Winkelbereich von $0.2 < \theta < 1.35$ messen, geladene Pionen und andere geladene höherenergetische Teilchen ($250\text{--}1200 \text{ MeV}/c$) werden im Faserdetektor nachgewiesen. Zusätzlich gibt es noch drei Lagen Szintillatorplatten zur Messung von Photonen aus Zerfällen neutraler Pionen.

Das Konzept des Rückstoßdetektors ist in Abbildung 42 dargestellt. Die 15 cm lange Targetzelle befindet sich im Zentrum. Von der Strahlachse nach außen gehend stellt sich der Aufbau wie folgt dar: hinter einem Gitter zur Abschirmung von Hochfrequenz befinden sich zwei Lagen Siliziumstreifendetektoren zur Messung der niederenergetischen Teilchen. Sie bestehen aus $300 \mu\text{m}$ dünnen, doppelseitig ausgelesenen $10 \times 20 \text{ cm}^2$ großen Siliziumeinkristallen mit $780 \mu\text{m}$ Streifenabstand. Außerhalb des 1 mm dünnen Aluminium-Strahlrohrs be-

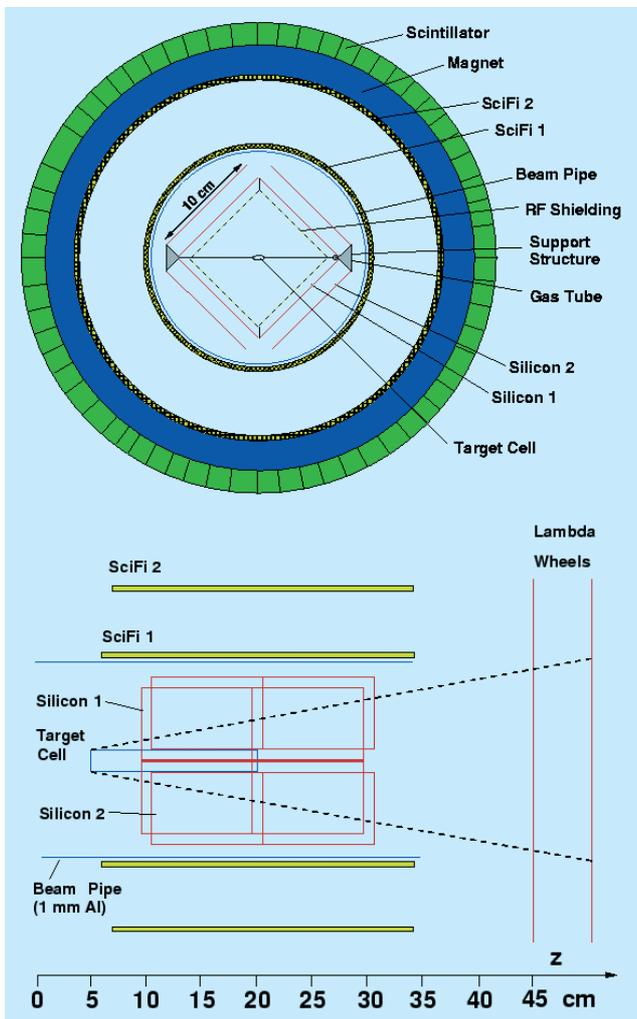


Abbildung 42: Querschnitt (oben) und Aufsicht (unten) des Rückstoßdetektors.

finden sich zwei Lagen Detektoren aus szintillierenden Fasern. Der Detektor aus szintillierenden Fasern

besteht aus einem inneren und einem äußeren zylinderförmigen Subdetektor mit 22 bzw. 36 cm Durchmesser und 28 cm Länge. Der innere Subdetektor besteht aus vier Lagen szintillierender Fasern von 1 mm Durchmesser, wobei zwei parallel zur Strahlachse und zwei unter einem Stereowinkel von etwa 10° aufgebracht sind. Jede Faser wird separat ausgelesen. Der äußere Subdetektor (SciFi2) hat vier Lagen mit Fasern von 1 mm Durchmesser, wiederum zwei Parallelagen und zwei Stereolagen. Fasern von jeweils zwei nachfolgenden Lagen werden in einen Lichtleiter gekoppelt und auf einen Photomultiplierkanal gegeben. Aus den Daten des Siliziumzählers und der beiden Detektoren aus szintillierenden Fasern ergeben sich die Raumkoordinaten, die zur Bestimmung von Teilchenspuren notwendig sind. Ein Solenoidmagnet erzeugt die für die Ladungstrennung und Impulsmessung nötige Magnetfeldstärke von 1.0 T. Das Magnetfeld sorgt zudem dafür, dass störende Möller-Elektronen aus dem Akzeptanzbereich des Siliziumzählers fallen. Um den Detektor aus szintillierenden Fasern herum befindet sich ein Detektor zur Messung von Photonen aus Zerfällen neutraler Pionen, der aus drei dünnen Lagen Wolfram und drei Lagen Szintillationszähler besteht. Das Wolfram dient als Schauermaterial zur Erhöhung der Nachweiswahrscheinlichkeit des Zählers. In der Kombination aller drei Subdetektoren ist ein Nachweis aller entstehenden Rückstoßteilchen und insbesondere die Identifikation von Rückstoßprotonen aus den DVCS-Prozessen möglich.

Der Bau des Detektorsystems wird Anfang 2004 abgeschlossen sein. Nach dem Einbau in das HERMES-Experiment werden zwei Jahre Datennahme und einzigartige Resultate zur Vermessung der generalisierten Partonverteilungen erwartet.

HERA-B Experiment

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

Sprecher: M. Medinnis, DESY

HERA-B ist ein Fixed Target Experiment, das die Protonen aus den Randbereichen des 920 GeV HERA-Protonenstrahls nutzt. Hierzu werden Targetdrähte aus unterschiedlichen Materialien (Kohlenstoff, Titan, Palladium und Wolfram) mittels einer Präzisionsmechanik an den Protonenstrahl herangefahren, bis die gewünschte Wechselwirkungsrate erreicht ist. Die Produkte der so erzeugten hochenergetischen Proton-Nukleon-Reaktionen werden im HERA-B Detektor, einem leistungsfähigen Spektrometer mit Teilchenidentifikation, registriert und vermessen.

Primärziel des Experiments im Berichtszeitraum war das Studium der Produktion von Charmonium-Zuständen und Beauty-Mesonen, insbesondere die Abhängigkeit von der Massenzahl des Targetkerns.

Die umfangreichen Reparatur- und Verbesserungsarbeiten am Experiment während der HERA-Betriebspause 2001 erwiesen sich als erfolgreich, es konnte eine Steigerung der Rate interessanter Ereignisse um mehr als einen Faktor 40 gegenüber der letzten Datennahmeperiode (2000) erreicht werden.

Leider verzögerte sich die Inbetriebnahme der HERA-Anlage durch diverse Schwierigkeiten erheblich, so dass erst ab Herbst 2002 mit dem regulären Datennahmebetrieb begonnen werden konnte. Die im Berichtszeitraum gesammelte Datenmenge blieb daher hinter den Erwartungen zurück. Dennoch wurde eine ausreichend große Datenmenge

akkumuliert, für die bereits erste Analysen durchgeführt wurden, und die eine Reihe interessanter Ergebnisse erwarten lässt.

Betriebsverhalten des HERA-B Detektors

Die lange Unterbrechung des HERA-Betriebs, die Ende 2001 zu Ende ging, bot die Gelegenheit, den Detektor HERA-B und sein Triggersystem fertig zu stellen. Gleichzeitig konnten viele Probleme gelöst werden, die während der Datennahmeperiode 2000 aufgetreten waren (Näheres dazu im Jahresbericht 2001).

In den Monaten bis September 2002 war die Wiederinbetriebnahme des Speicherrings HERA durch vielfältige technische Defekte und die unvorhergesehenen Probleme mit zu hohem Strahlungsuntergrund bei H1 und ZEUS so weit erschwert und verzögert, dass keine reguläre Datennahme stattfinden konnte. Diese Zeit wurde von der HERA-B Kollaboration effektiv genutzt, den jetzt vervollständigten Detektor neu und besser zu verstehen. Von Ende Oktober bis zur Weihnachtspause lieferte HERA längere Perioden stabilen Strahlbetriebes, die von HERA-B zur Datennahme genutzt wurden.

Abbildung 43 zeigt die anteilige Verteilung der Betriebszeit vom 30.10.2002 bis zum 22.12.2002, insge-

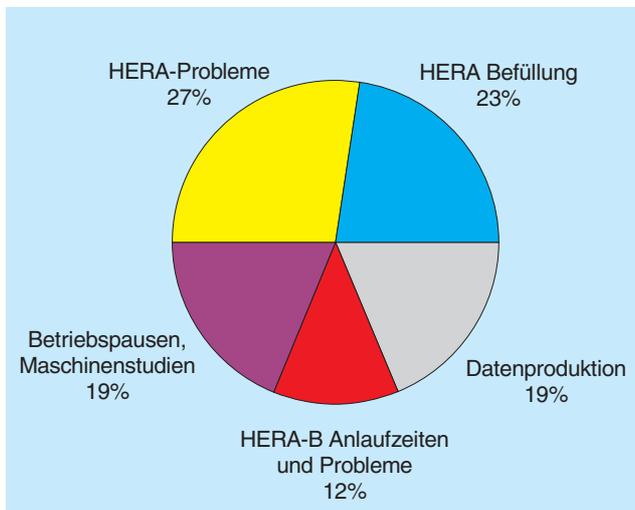


Abbildung 43: Anteilige Verteilung der Betriebszeit für die Periode 10.10.2002 – 22.12.2002.

samt wurden 250 Stunden zur Datenproduktion akkumuliert.

Die während der Betriebsunterbrechung 2001 durchgeführten Reparatur- und Verbesserungsarbeiten waren erfolgreich, was sich besonders deutlich in der Rate aufgezeichneter J/ψ -Mesonen widerspiegelt: Sie erreichte bereits Anfang November mehr als 1000 J/ψ pro Stunde, während sie im Jahr 2000 noch auf 25 pro Stunde begrenzt war. Für diese Verbesserung um mehr als einen Faktor 40 sind viele Faktoren maßgeblich, insbesondere:

- Deutliche Verbesserungen im elektromagnetischen Kalorimeter, vor allem durch bessere Kopplung der Signale vom Detektor an die Ausleseelektronik. Auswirkungen auf die Datenqualität der vom Kalorimeter getriggerten Ereignisse werden auf Seite 77 diskutiert.
- Verbesserungen im Myonsystem, einerseits durch verringerte Empfindlichkeit gegenüber Untergrund durch Modifikationen an den Vorverstärkern und deren Anbindung an die Ausleseelektronik, andererseits durch erfolgreiche Bemühungen, defekte Kanäle zu reparieren und die Stabilität des Systems zu erhöhen.
- Eine Reduzierung von Hochspannungsausfällen im äußeren Spurkammersystem um mehr als einen Faktor 10. Dies wurde durch einen vollständigen Ausbau

des Detektors erreicht, bei dem 14 000 falsch angebrachte Kondensatoren ersetzt wurden. Die gesteigerte Hochspannungssicherheit des Systems führte zu einer signifikanten Erhöhung der Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors, sie beträgt nun im Mittel 95% für die 5 mm Zellen und 98% für die 10 mm Zellen. Die Effizienz der Spurerkennung wurde hierdurch sowohl im Trigger als auch in der endgültigen Rekonstruktion nachhaltig verbessert.

- Die Spurverfolgung im äußeren Spurkammersystem und in den Myonkammern in der ersten Triggerstufe (FLT) wurde erfolgreich in Betrieb genommen.
- In der zweiten Triggerstufe wurde ein vollständig neuer, verbesserter Spurerkennungs-Algorithmus angewendet.
- Die 240 Prozessoren der zweiten Triggerstufe mit einer Taktrate von 400 MHz wurden durch 1.3 GHz-Prozessoren ersetzt. Hierdurch konnte die Totzeit reduziert und der Datendurchsatz erhöht werden.
- Die Stabilität des Datennahmesystems wurde verbessert und der Datendurchsatz um mehr als einen Faktor 10 erhöht.

Die Verbesserungen an der PC-Farm der zweiten Triggerstufe und auch die endgültige Inbetriebnahme von deren Kontrollsoftware erlaubt es, nun beide PC-Farmen von HERA-B zur Rekonstruktion oder für Monte Carlo-Rechnungen zu benutzen, sobald sie für die Datennahme nicht gebraucht werden. Dadurch ist es möglich, die mit hoher Rate aufgezeichneten Ereignisse in den Strahlpausen zu reprozessieren, wodurch diese, vollständig rekonstruiert, nur Stunden oder Tage nach ihrer Aufzeichnung für die Analyse zur Verfügung stehen.

Physikalische Resultate und Ziele

Der Zeitraum von Oktober bis Dezember wurde unter relativ konstanten Bedingungen des Beschleunigers für die Aufnahme des 2002er Datensamples genutzt.

Insgesamt konnten in diesem Zeitraum etwa 75 Millionen getriggerte Zwei-Lepton-Ereignisse von zwei gleichzeitig am Strahl befindlichen Targetdrähten (Kohlenstoff und Wolfram) aufgenommen werden. Zusätzlich wurden etwa 150 Millionen Ereignisse ohne

Triggerselektion (Minimum Bias Daten) für QCD-Studien mit verschiedenen Targetmaterialien aufgezeichnet.

Die Analyse der im Jahr 2000 aufgenommenen Daten wurde weitergeführt und die endgültigen Resultate zur Messung des $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitts, der Produktion von χ_c -Mesonen und des inklusiven Strangeness-Produktionswirkungsquerschnitts publiziert.

Charmonium-Produktion

Die hadronische Produktion von schweren Quarks an Fixed-Target-Experimenten erlaubt genaue Tests der perturbativen QCD. Die in jüngster Zeit veröffentlichten Vorhersagen für den Produktionswirkungsquerschnitt sind kompatibel mit Ergebnissen von Experimenten an Pionen- und Protonenstrahlen; allerdings sind sowohl die theoretischen als auch die experimentellen Fehler relativ groß.

Bei HERA-B wird der $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitt für Proton-Nukleon Wechselwirkungen bei 920 GeV aus der Reaktion $B \rightarrow J/\psi X$ gemessen, wobei das J/ψ über die dileptonischen Zerfälle $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ und $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ identifiziert wird. Hierbei sucht man nach Ereignissen, bei denen das J/ψ , wegen der langen Lebensdauer der B-Mesonen, deutlich vom Vertex der Primärreaktion getrennt erzeugt wird.

Die Analyse der Daten aus dem Jahr 2000 wurde bereits im Jahresbericht 2001 vorgestellt, sie konnte im Berichtsjahr abgeschlossen und die endgültigen Ergebnisse publiziert werden.

Die wesentlich vergrößerte Statistik des Berichtsjahres wird eine neuerliche und erheblich genauere Bestimmung des $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitts ermöglichen, zudem wird es möglich sein, ausgewählte B-Meson Zerfälle vollständig zu rekonstruieren und so den gemessenen Wirkungsquerschnitt unabhängig zu überprüfen.

Eine erste Studie der neuen Daten zeigt, dass neben der größeren Ereigniszahl eine deutliche Verbesserung der Qualität der Daten, so zum Beispiel in der Massenauflösung der J/ψ -Mesonen, im Vergleich zur Datennahme 2000 erreicht wurde. Abbildung 44 zeigt das invariante Massenspektrum von $\mu^+\mu^-$ -Paaren. Zur Identifikation der Myonen wurden Informationen des Myon-

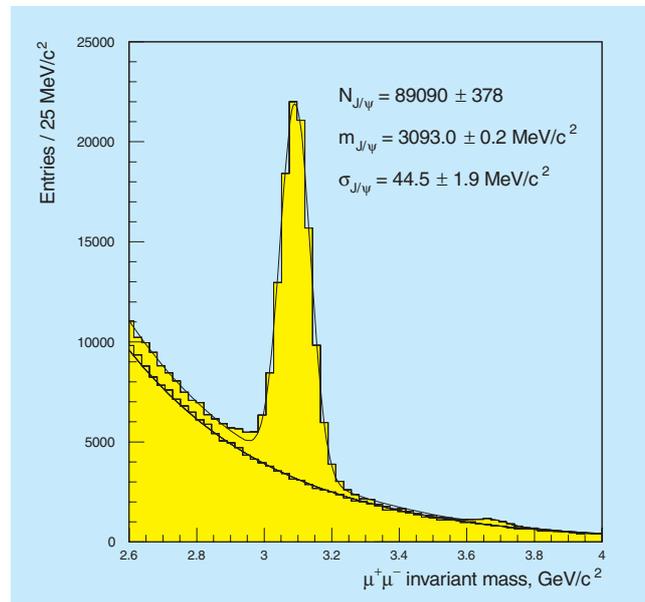


Abbildung 44: *Invariantes Massenspektrum von $\mu^+\mu^-$ -Paaren. Nicht nur das J/ψ ($m = 3.09 \text{ GeV}/c^2$), sondern auch das $\psi(2S)$ ($m = 3.63 \text{ GeV}/c^2$) ist deutlich erkennbar. Die durchgezogenen Linien sind Anpassungsrechnungen an die Daten, die untere Kurve stellt die Massenverteilung für gleichgeladene μ -Paare dar.*

systems und der Spurkammern verwendet. Insgesamt wurden in den Daten von Oktober bis Dezember etwa 90 000 J/ψ -Mesonen im Myon-Zerfallskanal nachgewiesen. Die Massenauflösung beträgt etwa 45 MeV und konnte damit um etwa 20% gegenüber 2000 verbessert werden.

Zur Analyse von $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ Zerfällen werden Spuren von Teilchen benutzt, die im elektromagnetischen Kalorimeter ein Signal erzeugen, deren Energie mit dem im Spurkammersystem gemessenen Impuls übereinstimmt. Die Elektronen können allerdings einen Teil ihrer Energie bereits vor Erreichen des Kalorimeters durch Bremsstrahlung verlieren. Findet die Bremsstrahlung vor dem Magneten statt, so erzeugen Elektronen und Bremsstrahlungsphoton zwei voneinander getrennte Cluster im Kalorimeter. Durch die getrennte Rekonstruktion des Bremsstrahlungsphotons und seine Berücksichtigung bei der Energiemessung des Elektrons kann die Genauigkeit der Energiemessung verbessert werden.

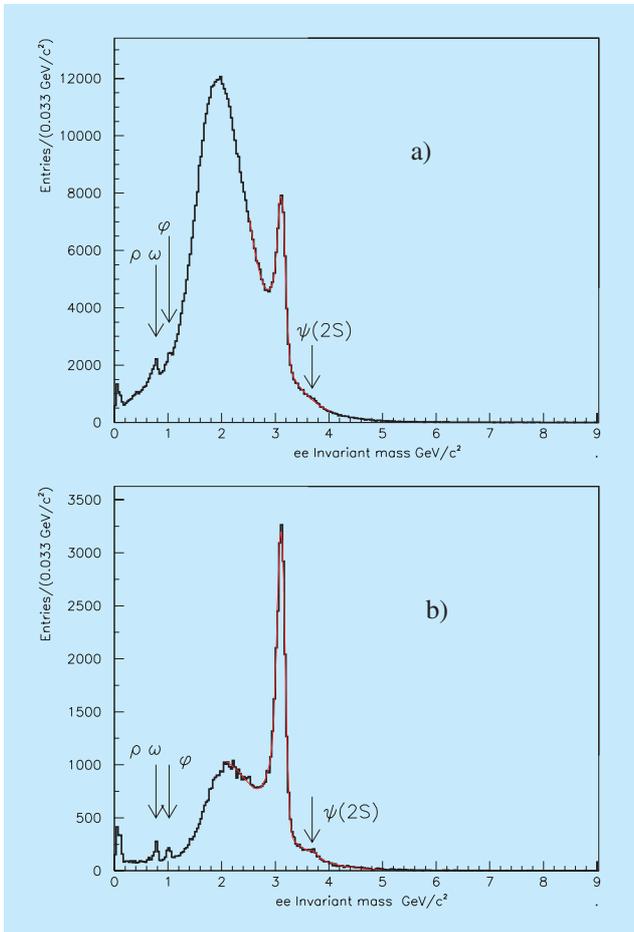


Abbildung 45: Invariantes Massenspektrum von e^+e^- -Paaren: a) ohne Forderung eines assoziierten Bremsstrahlungsphotons, b) mindestens ein assoziiertes Bremsstrahlungsphoton wurde gefunden.

Des Weiteren erlaubt der Nachweis eines zum Elektron assoziierten Bremsstrahlungsphotons eine Verminderung von Fehlidentifikationen der Elektronen, was zu einem deutlich besseren Signal-zu-Untergrund-Verhältnis im invarianten Massenspektrum von e^+e^- -Paaren führt. In Abbildung 45 ist die invariante Masse von e^+e^- -Paaren dargestellt, und zwar ohne und mit der Zusatzbedingung, dass zu mindestens einer Spur ein Bremsstrahlungsphoton rekonstruiert werden konnte.

Neben dem prominenten J/ψ -Signal bei 3.1 GeV sind das $\psi(2S)$ sowie die seltenen Zwei-Elektron-Zerfälle von ρ/ω - und ϕ -Mesonen klar zu erkennen. Die Massenauflösung für das J/ψ im Elektronen-Zerfall be-

trägt etwa 80 MeV. Die erhebliche Verbesserung des Elektronen- und Photonennachweises gegenüber dem Jahr 2000 wird deutlich, wenn man erinnert, dass zum damaligen Zeitpunkt das in Abbildung 45a) gezeigte Spektrum keine Struktur, auch nicht das prominente J/ψ -Signal, aufwies.

Der HERA-B Zwei-Spur-Trigger selektiert neben den J/ψ -Mesonen auch die weiteren Charmonium-Zustände $\psi(2S)$ und χ_c .

Bereits mit dem kleinen Datensatz des Jahres 2000 konnte das Produktionsverhältnis von χ_c -Mesonen zu J/ψ -Mesonen

$$R(\chi_c) = \sigma(\chi_c) \cdot \text{Br}(\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma) / \sigma(J/\psi) \quad \text{zu}$$

$$R(\chi_c) = 0.32 \pm 0.06 \text{ (stat)} \pm 0.04 \text{ (sys)}$$

bestimmt werden (siehe Jahresbericht 2001). Dieses Ergebnis der HERA-B Messung aus den Daten von 2000 basierte auf 380 ± 74 rekonstruierten χ_c -Mesonen, die endgültige Analyse wurde im Berichtsjahr publiziert.

In den im Berichtszeitraum aufgezeichneten Daten sind mehr als eine Größenordnung mehr χ_c -Mesonen rekon-

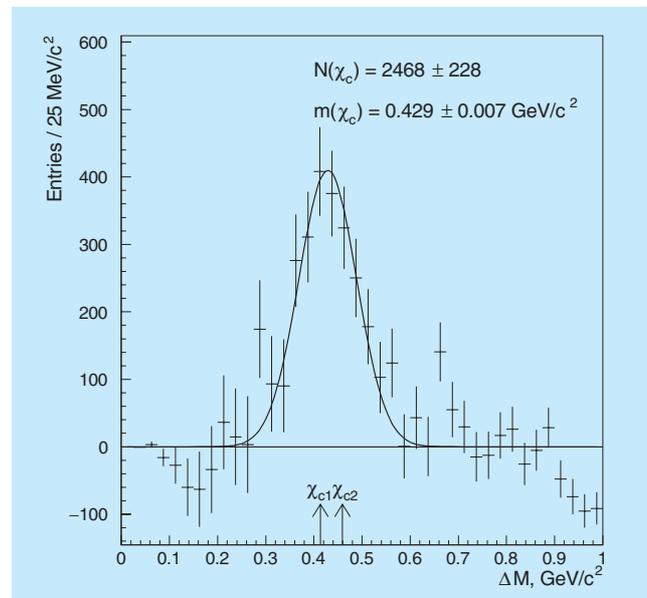


Abbildung 46: Das invariante Massenspektrum $\Delta M = (\mu^+\mu^-\gamma) - (\mu^+\mu^-)$ nach Subtraktion des kombinatorischen Untergrundes (es wurde etwa ein Drittel der Daten des Jahres 2002 prozessiert).

Signal	Statistik 2000 ≈	Statistik 2002 ≈	Statistik 2002 C und W Target
$J/\psi \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$	8000	150 000	≈ 50 000
$\psi(2s) \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$	150	2000	
$\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma \rightarrow e^+e^-\gamma/\mu^+\mu^-\gamma$	350	10 000	
$\Upsilon \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$		30	

Tabelle 1: Erwartete Signale aus dem Datensatz 2002 im Vergleich zur Datennahme 2000.

strierbar (Tabelle 1), so dass der statistische Fehler dieser Messung deutlich reduziert werden kann.

Abbildung 46 zeigt die aus dem Datensatz im Kanal $\chi_c \rightarrow (J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)\gamma$ rekonstruierten χ_c -Mesonen, basierend auf etwa einem Drittel der vollen Statistik 2002. Bereits hier ist das χ_c mit guter Statistik sichtbar.

Das Hauptziel der Datennahme 2002/03 ist die Untersuchung der Abhängigkeit der Erzeugung verschiedener Charmonium-Zustände von der Massenzahl des Targetkerns. Ein erheblicher Teil der Daten wurde daher mit zwei Targetdrähten (Kohlenstoff und Wolfram) gleichzeitig aufgenommen. Die Möglichkeit, mit verschiedenen Targetmaterialien simultan zu messen, hilft, die systematischen Fehler einer solchen Messung zu reduzieren.

Besonderes Interesse erlangen die Messungen bei HERA-B durch den erstmals zugänglichen kinematischen Bereich von negativem Feynman-x, das heißt der Messung bei großen Streuwinkeln. In diesem Fall ist die Aufenthaltsdauer des Charmoniums im Kern am größten, und man erwartet eine starke Abhängigkeit von der Massenzahl des Kerns. Damit können die verschiedenen theoretischen Modelle für die Produktion und Absorption von Charmonium-Teilchen getestet werden. Durch gleichzeitige Messung von J/ψ -, $\psi(2s)$ - und χ_c -Mesonen, die verschiedene Bindungsenergien haben und damit unterschiedlich sensitiv auf die einzelnen Absorptionsmechanismen reagieren, gibt es eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung der verschiedenen theoretischen Modelle.

Die Analyse der Daten des Berichtsjahres ist noch nicht abgeschlossen, so dass in Tabelle 1 nur die zu erwartenden Signale der einzelnen Charmonium-Zustände zusammengestellt wurden.

Minimum-Bias Physik

Die Aufnahme von Proton-Kern-Ereignissen ohne einen selektiven Trigger (Minimum Bias Ereignisse) ermöglicht eine Vielzahl von Studien zur QCD-Physik. Hierbei sind die exzellenten Eigenschaften des HERA-B Spektrometers hinsichtlich der Spurfindung und der Teilchenidentifikation wesentlich.

Fortschritte in der Schwerionenphysik haben das Interesse an Untersuchungen zur Produktion von Teilchen mit Strangeness erneuert. Zum besseren Verständnis dieser Prozesse werden genaue Untersuchungen bei Kern-Kern- und Proton-Kern-Wechselwirkungen benötigt. Eines der Ziele der Schwerionenexperimente ist die Suche nach einem Quark-Gluon Plasma.

Die Schwierigkeit ist jedoch der Nachweis, ob tatsächlich ein Quark-Gluon Plasma erzeugt wurde. Hierbei wird als eine der möglichen Signaturen die erhöhte Produktion von Teilchen mit Strangeness diskutiert. Als beobachtbare Größen dienen zum Beispiel die Verhältnisse von Antibaryonen zu Baryonen im kinematischen Bereich mittlerer Rapidität, oder die Abhängigkeit vom Transversalimpuls.

Die Analyse von 2.4 Millionen Minimum Bias Ereignissen, die während der Strahlzeit 2000 innerhalb einer Woche Datennahme aufgezeichnet wurden,

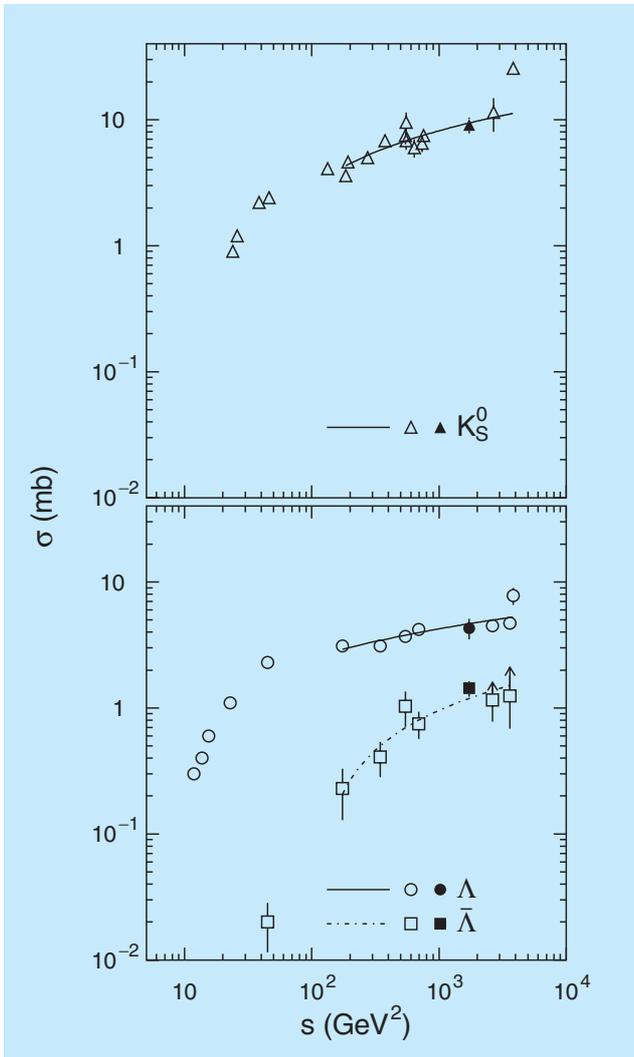


Abbildung 47: Totaler Proton-Nukleon Produktions-Wirkungsquerschnitt für K_S^0 -, Λ - und $\bar{\Lambda}$ -Teilchen als Funktion der Schwerpunktsenergie s . Die schwarzen Symbole zeigen die Messungen von HERA-B.

konnte im Berichtsjahr fertig gestellt werden. Die Daten wurden mit den Targetmaterialien Kohlenstoff, Aluminium, Titan und Wolfram aufgezeichnet. Mit diesem Datensatz wurde der inklusive Produktions-Wirkungsquerschnitt für K_S^0 -, Λ - und $\bar{\Lambda}$ -Teilchen in Kollisionen von 920 GeV Protonen mit den verschiedenen Targetmaterialien gemessen. Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse des HERA-B Experiments im Vergleich mit älteren Experimenten.

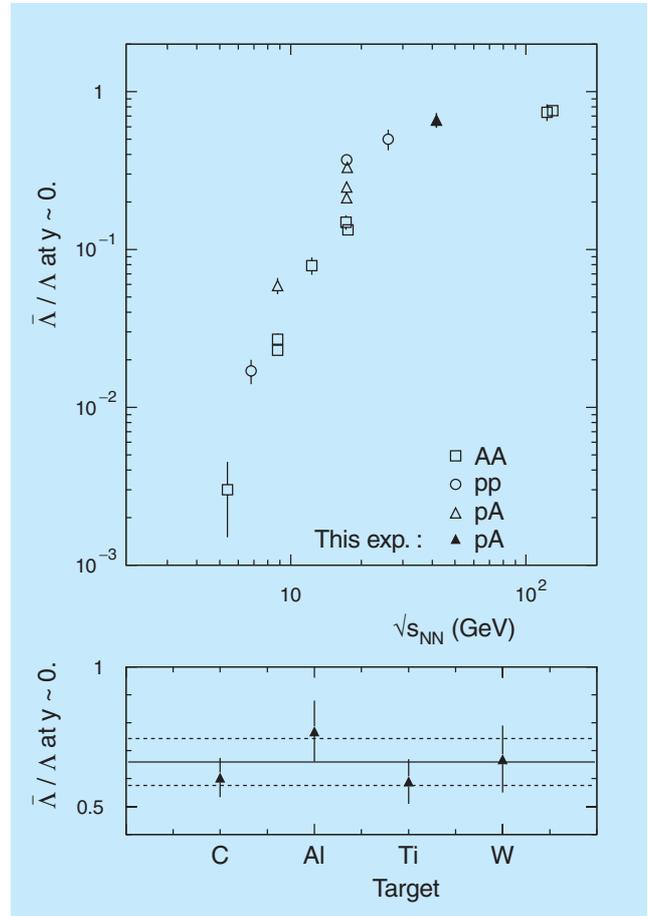


Abbildung 48: Verhältnis von $d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda})$ für pp (Kreise), pA (Dreiecke) und AA (Quadrate) Wechselwirkungen als Funktion der Nukleon-Nukleon Schwerpunktsenergie. Das schwarz gefüllte Dreieck stellt den Mittelwert der HERA-B Messung dar. In der unteren Darstellung ist das Verhältnis $d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda})$ einzeln für die verwendeten Targets bei $x_F \approx -0.06$ abgebildet (Mittelwert und Standardabweichung sind durch die durchgezogene bzw. gestrichelten Linien angedeutet).

Genauer als die Produktions-Wirkungsquerschnitte selbst sind Wirkungsquerschnittsverhältnisse, da sich in diesem Fall Akzeptanzkorrekturen und systematische Fehler zu einem großen Teil gegenseitig auslöschen. Aus den Messungen folgt für die Verhältnisse:

$$\begin{aligned} d\sigma(K_S^0)/d\sigma(\Lambda) &= 6.2 \pm 0.5 & \text{und} \\ d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda}) &= 0.66 \pm 0.07 & \text{für } x_F \approx -0.06. \end{aligned}$$

Signal	Statistik 2002 \approx
K_s^0	3 500 000
Λ	900 000
$\bar{\Lambda}$	450 000
ϕ	60 000
Ξ^- / Ξ^+	8000
Ω^- / Ω^+	800
ρ_{770}	200 000
ω_{782}	15 000
K_{892}^{0*}	200 000
D^0	600
D^+	150
D^{*+}	150

Tabelle 2: Erwartete Signale für die HERA-B Datennahme 2002.

Das Verhältnis von $d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda})$ ist in Abbildung 48 für die untersuchten Targetmaterialien dargestellt. Erste HERA-B Ergebnisse zur Produktion von Teilchen mit Strangeness wurden im Berichtszeitraum publiziert. Im Dezember 2002 wurden etwa 150 Millionen Minimum-Bias-Daten aufgezeichnet. Damit wurde die Statistik des Jahres 2000 um mehr als einen Faktor 60 vergrößert. Tabelle 2 zeigt, wieviele Ereignisse für verschiedene Teilchen aus diesem Datensatz erwartet werden.

Mit dieser Statistik werden nun auch Messungen der Produktion seltener Hyperonen sowie Messungen zur Polarisation von Hyperonen möglich sein.

Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem Datensatz des Berichtsjahres auch eine relevante Messung des Open-Charm-Wirkungsquerschnitts möglich sein sollte. Vorhersagen für den Wirkungsquerschnitt im Energiebereich von HERA-B bei 920 GeV liegen zwischen 9 und 71 μb , abhängig von der verwendeten QCD-Skalierung. Eine Messung von HERA-B würde wesentlich zur Einschränkung der möglichen Theorien beitragen.

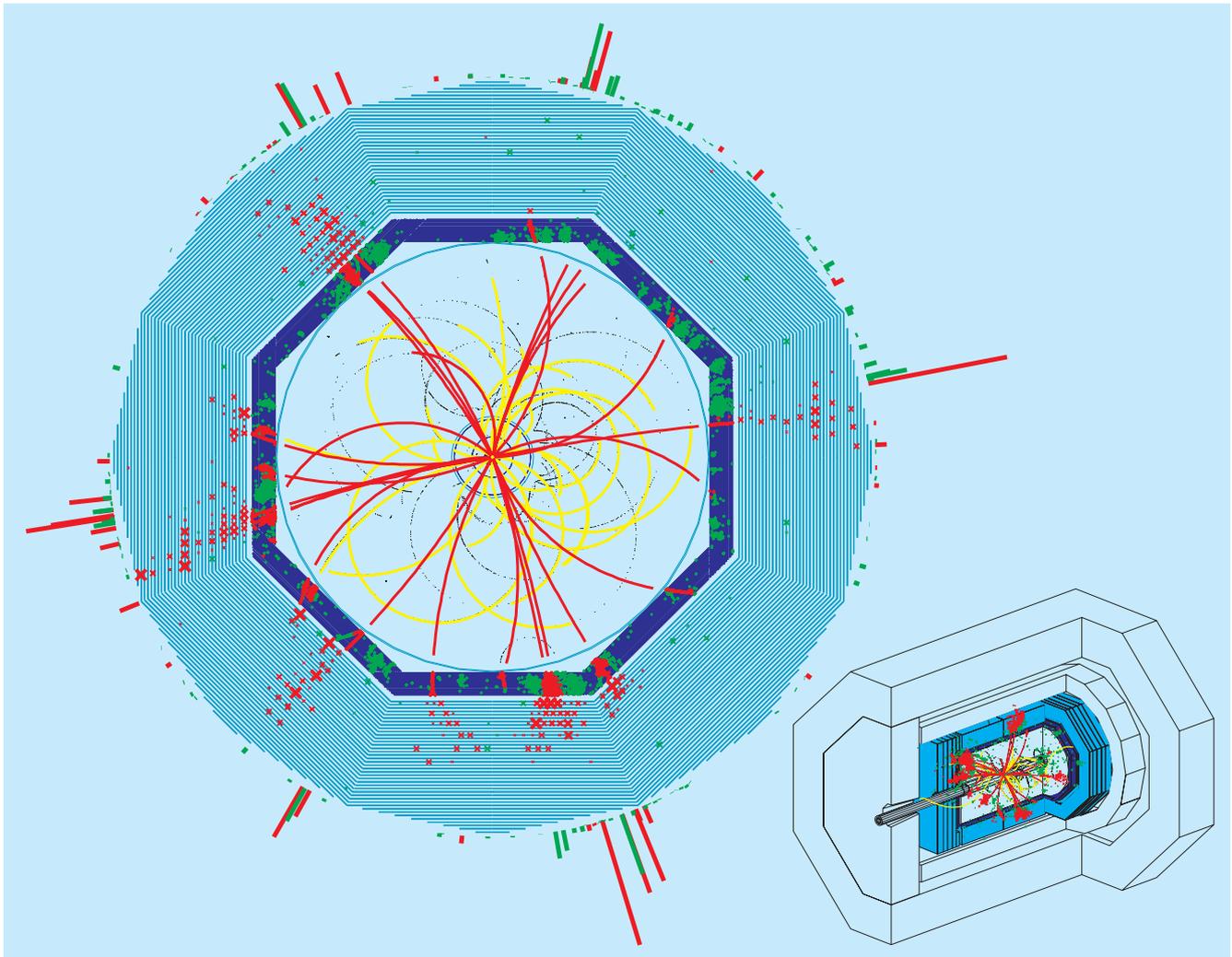


Abbildung 49: *Simuliertes Top-Anti-Top-Ereignis bei einer Schwerpunktsenergie von 380 GeV im TESLA-Detektor. Gezeigt sind in der Projektion senkrecht zur Strahlachse (oben) nur die innerhalb der Magnetspule gelegenen Komponenten, von innen nach außen: die zentralen Spurdetektoren (Vertexdetektor und Time Projection Chamber) und Kalorimeter (elektromagnetischer und hadronischer Teil). Die Balken an der Peripherie repräsentieren die Energien einzelner rekonstruierter Teilchen und ihre Richtungen am Wechselwirkungspunkt. Dabei wurde für geladene Teilchen (rot) die Spurkammer-Messung verwendet, für neutrale (grün) das Kalorimeter.*

Forschung an Lepton Collidern

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

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

Die Vorbereitungen für das Forschungsprogramm bei TESLA waren im Jahre 2002 durch weiter intensivierte internationale Zusammenarbeit geprägt.

Im Rahmen der erweiterten ECFA-DESY-Studie wurden die Untersuchungen zur Physik und zum Detektor an einem e^+e^- -Linear-Collider wie TESLA vertieft. Die Auslotung des Synergiepotentials, das sich im Wechselspiel mit Forschungen an anderen künftigen Beschleunigern ergibt, rückte dabei als ein neuer Schwerpunkt ins Blickfeld, während bei der Detektorentwicklung die Vorbereitung gemeinsamer Testaufbauten internationaler Gruppen konkretisiert wurde.

Die Studien finden eine von Jahr zu Jahr wachsende Resonanz auf regionalen und internationalen Linear-Collider Konferenzen, im Jahr 2002 in Frankreich, Tschechien und Korea, zu denen Mitglieder der Gruppe FLC zentrale und führende Beiträge geliefert haben.

Der Linear-Collider TESLA

Es besteht inzwischen innerhalb der Gemeinschaft der Hochenergiephysiker ein globaler Konsens, dass als nächstes Beschleunigerprojekt der Teilchenphysik ein Elektron-Positron-Linearbeschleuniger mit einer Energie von $\sqrt{s} = M_Z$ bis zu etwa 1 TeV benötigt wird. Auf diesem Konsens aufbauend sind weitere Schritte in Richtung Realisierung des Projekts als international koordinierte Aktivitäten unternommen worden. Bei der Detektorentwicklung in Europa, Asien und Amerika beispielsweise werden die Projekte bereits in der

Begutachtungsphase auf die Aktivitäten in den jeweils anderen Regionen abgestimmt, und die Ergebnisse werden bei regelmäßigen interregionalen Arbeitstreffen ausgetauscht.

Für den Linear-Collider selbst werden verschiedene technische Varianten entwickelt. Das International Committee for Future Accelerators (ICFA) hat eine international besetzte Expertenkommission einberufen, um diese Vorschläge auf noch ungelöste Fragen hin zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Dabei wurde das TESLA-Konzept als das am weitesten entwickelte bewertet und als das einzige Projekt eingestuft, bei dem es keine grundsätzlichen Probleme mehr gibt, die einer Realisierung im Wege stehen.

Auch auf nationaler Ebene ist das TESLA-Projekt mit hervorragenden Noten ausgezeichnet worden. Der von der Bundesregierung beauftragte Wissenschaftsrat hat DESY eine bestmögliche Vorbereitung attestiert und TESLA zur Realisierung empfohlen, sofern der Weg zur internationalen Finanzierung konkretisiert werden kann.

Physikstudien bei TESLA

Untersuchungen zum Physikpotential von TESLA haben zwei Motivationen: Erstens wird untersucht, inwieweit man von TESLA Sensitivität auf bekannte und neue theoretische Szenarien erwarten kann. Zweitens dienen die Studien auch zur Optimierung des Detektorkonzepts, da die zu erwartenden Physikprozesse die benötigte Detektorauflösung definieren. Die Gruppe FLC hat im Jahr 2002 weiterhin eine führende Rolle bei

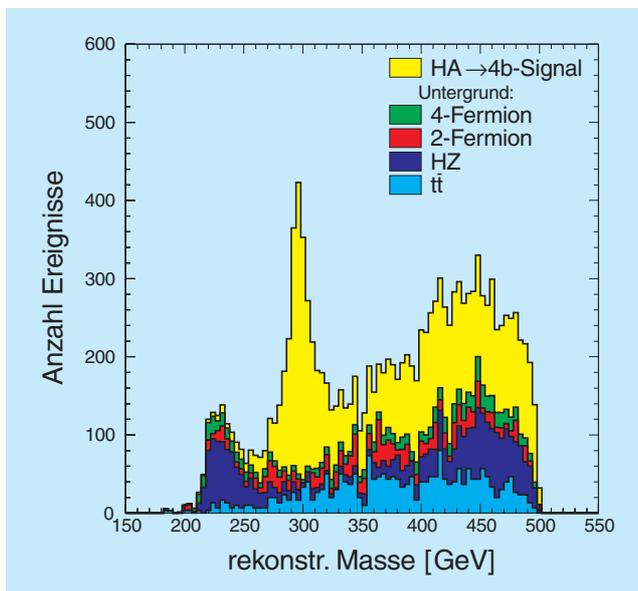


Abbildung 50: Produktion schwerer Higgs-Bosonen: Rekonstruktion der Masse im Endzustand mit 4 b-Quarks.

den Physikstudien innerhalb der ECFA/DESY-Studie gespielt. Schwerpunkte bildeten Untersuchungen im Bereich der Higgs-Bosonen und der Supersymmetrie. Auch auf dem Gebiet der elektroschwachen Präzisionsphysik und der Physik des Top-Quarks gibt es wichtige Beiträge.

Higgs-Physik

Ein Bereich der Higgs-Physik, der im Technical Design Report (TDR) noch nicht ausreichend untersucht wurde, ist die Produktion der schweren Higgs-Bosonen A^0 und H^0 , die in supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells vorhergesagt werden. Der wichtigste Prozess ist die Paarproduktion von A^0 und H^0 . Dieser Prozess wird momentan in den Endzuständen mit vier b-Quarks und mit zwei b-Quarks und zwei Tau-Leptonen simuliert. Es zeigt sich, dass sich das Signal klar vom Untergrund abtrennen lässt (Abb. 50).

Von besonderer Wichtigkeit ist hier, wie für viele Higgs-Analysen, die Identifikation von b-Quarks mit Hilfe des Vertex-Detektors. Algorithmen sind in den letzten Jah-

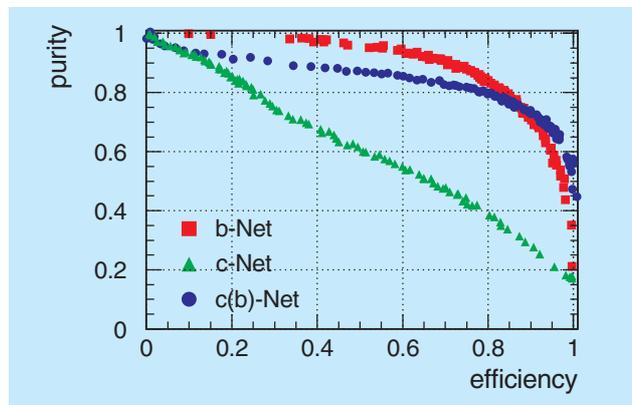


Abbildung 51: Effizienz und Reinheit für die Identifikation von b- und c-Quarks aus Z^0 -Zerfällen in der schnellen Detektorsimulation SIMDET.

ren entwickelt worden, die unter Verwendung neuronaler Netze eine exzellente Nachweiswahrscheinlichkeit für b- und c-Quarks erlauben. Im letzten Jahr wurde eine realistische Version des Algorithmus in der schnellen Detektorsimulation SIMDET implementiert, die allen Arbeitsgruppen zur Verfügung steht. Die Effizienz der neuen b- und c-Quark-Identifikation in der schnellen Simulation SIMDET ist in Abbildung 51 gezeigt. Weitere Studien beschäftigen sich mit der Rekonstruktion der CP-Eigenschaften aus Winkelkorrelationen in Zerfällen von Higgs-Bosonen in Tau-Lepton-Paare.

Supersymmetrie

Supersymmetrie (SUSY), wenngleich bisher nicht entdeckt, bildet ein sehr attraktives Modell für Physik jenseits des Standardmodells. Suchen nach supersymmetrischen Teilchen bei LEP haben den erlaubten Parameterraum für viele Modelle stark eingegrenzt. In der letzten Zeit finden Theorien, in denen der supersymmetrische Partner des Higgs-Bosons in Endzustände mit Tau-Leptonen zerfällt, vermehrt Aufmerksamkeit. Diese Zustände sind von den LEP-Suchen bisher nur wenig eingeschränkt. Im TESLA TDR wurden zwar Zerfälle in Elektronen und Myonen ausführlich untersucht, Zerfälle mit Tau-Leptonen im Endzustand weniger. Diese Zustände, die besondere Herausforderungen an den Detektor stellen, sind im letzten Jahr studiert worden.

Eine Studie beschäftigte sich mit der Produktion von Neutralinos, den neutralen supersymmetrischen Partnern von Photon, Z-Boson und neutralen Higgs-Bosonen. Es wurde gezeigt, dass sich das Signal vom Standardmodell-Untergrund abtrennen lässt, dass jedoch andere SUSY-Prozesse als Untergrund berücksichtigt werden müssen. Eine Präzisionsbestimmung der Neutralino-Masse erfordert in einem solchen Szenario eine Messung an der Produktionsschwelle, da sie sich im Kontinuum wegen der auftretenden Tau-Neutrinos nicht genauer als etwa 2 GeV bestimmen lässt.

LHC/LC Arbeitsgruppe

Im Jahr 2002 begann eine internationale Arbeitsgruppe, zu untersuchen, wie sich der Large Hadron Collider (LHC) und der Linear-Collider (LC) gegenseitig ergänzen. In vielen Studien ist in den letzten Jahren immer wieder auf die Komplementarität der beiden Maschinen hingewiesen worden. Ziel der Arbeitsgruppe ist es, diese allgemeinen Aussagen zu konkretisieren und in enger Zusammenarbeit mit Physikern der LHC- und der LC-Arbeitsgruppen auszuarbeiten, wie eine solche Komplementarität konkret aussieht. Ein besonderes Interesse findet dabei die Frage, wie, wenn beide Maschinen gleichzeitig operieren, Ergebnisse der einen Maschine das Messprogramm an der anderen Maschine beeinflussen können.

Beispiele für die Komplementarität finden sich in fast allen Physikbereichen, die am LC oder am LHC untersucht werden sollen: im Bereich der Higgs-Studien wird die präzise Messung von Verzweigungsverhältnissen der einzelnen Higgs-Zerfälle am LC dem LHC erlauben, seine Messung des Wirkungsquerschnittes assoziierter Higgs-Top-Quark Produktion direkt als Messung der Kopplungsstärke des Top-Quarks an das Higgs-Boson zu interpretieren.

Im Bereich von Supersymmetrie lässt sich durch die Präzisions-Massenbestimmung der leichteren SUSY-Teilchen am LC eine deutliche Verbesserung für die nur am LHC zugänglichen schwereren SUSY-Teilchen erzielen. Die LHC/LC Arbeitsgruppe plant, im Laufe des Jahres 2003 einen ersten Zwischenbericht mit quantitativen Ergebnissen zu veröffentlichen.

Detektorstudien

Das Physik-Programm bei TESLA stellt sehr hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Detektors, die den gegenwärtigen Stand der Technik teilweise übertreffen. Zwar ist in den vergangenen Jahren die Entwicklung von Detektoren für Hadron-Maschinen mit großem Aufwand vorangetrieben worden, doch standen dabei die hohe Ereignisrate und die starke Strahlenbelastung im Vordergrund. Da ein e^+e^- -Linear-Collider von solchen Problemen weitgehend verschont bleibt, scheinen die Detektor-Anforderungen auf den ersten Blick leicht erfüllbar. Doch das in den Physikstudien aufgezeigte Potential von Präzisionsmessungen verlangt nach Nachweisgeräten, die bisher unerreichten Ansprüchen an die Messgenauigkeit genügen.

Die Impulsauflösung des Spurdetektors etwa sollte zehnmal besser als die existierender Detektoren sein. Sie entscheidet darüber, wie gut sich verschiedene Ereignisarten voneinander trennen lassen und wie genau sich die Massen möglicher neuer Teilchen bestimmen lassen. Dies soll zum einen durch ein höheres Magnetfeld erreicht werden, zum anderen ist aber eine präzisere Messung der Spurpunkte vonnöten.

Die Jetenergie-Auflösung des Kalorimeters muss doppelt so gut sein wie die der besten bisher gebauten, um zum Beispiel hadronisch zerfallende W- und Z-Bosonen voneinander unterscheiden zu können. Dazu müssen die Detektoren um mehrere Größenordnungen feiner unterteilt sein. Neben der Entwicklung kostengünstiger und zuverlässiger Auslesesysteme für die daraus resultierende hohe Zahl von elektronischen Kanälen ist auch ein vollkommen neuer Ansatz in der Rekonstruktion der Ereignisse erforderlich, der dem einer Spurkammer ähnlicher ist als dem eines konventionellen Kalorimeters.

Bisher unerreichte Anforderungen an die Messgenauigkeit gelten auch für weitere Detektorkomponenten, beispielsweise die Vertexdetektoren, die c-Quarks erkennen müssen, oder die strahlnahen Kalorimeter, die aufgrund der am Linear-Collider erstmals signifikant auftretenden Beamstrahlung neue Herausforderungen darstellen.

Die Gruppe FLC ist aktiv beteiligt an der Entwicklung der Haupt-Spurkammer und des Hadron-Kalorimeters. Ein Wissenschaftler arbeitet darüber hinaus mit an der

Auslegung der Wechselwirkungszone, die Randbedingungen sowohl der Maschine als auch des Detektors zu berücksichtigen hat.

Time Projection Chamber

Als zentraler Spurdetektor bei TESLA wurde im TDR eine großvolumige „Time Projection Chamber“ (TPC) vorgeschlagen. Solche Kammern bestehen aus einem Minimum an störendem Material und liefern entlang der Bahnen geladener Teilchen eine große Zahl dreidimensionaler Raumpunkte zur Spurrekonstruktion. Das Materialbudget und die Ortsauflösung der einzelnen Punkte sollen gegenüber existierenden Detektoren weiter verbessert werden, indem zur Auslese anstelle der bisher eingesetzten Drahtkammern neuartige Mikrostrukturen, zum Beispiel „Gas Electron Multiplier“ (GEM) Folien verwendet werden. GEM-Folien weisen insbesondere bei den angestrebten hohen Magnetfeldern geringere Messfehler durch Feldverzerrungen auf, und sie unterdrücken den Rückfluss positiver Ionen aus der Verstärkungsstruktur in das Kammervolumen, so dass der Detektor totzeitfrei betrieben werden kann. Auf diese beiden Vorteile konzentrieren sich auch die TPC-Forschungsarbeiten der Gruppe FLC.

Um die hohe intrinsische Auflösung der GEM-Folien ausschöpfen zu können, ohne die Segmentierung der Auslesefläche und damit die Zahl der kostspieligen elektronischen Kanäle zu sehr zu erhöhen, sollte das Ladungssignal einer Spur möglichst so auf benachbarte Anodenfelder verteilt sein, dass Schwerpunktsmethoden zur Koordinatenbestimmung verwendet werden können. Bereits durchgeführte Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass sich durch eine zickzackförmige Unterteilung der Auslesestruktur eine deutliche Verbesserung der Auflösung erreichen lässt. Im Berichtsjahr konnte dieser Effekt auch erstmals experimentell nachgewiesen werden.

Als nächstes ist vorgesehen, die Studien zur Detektorentwicklung unter realistischen Bedingungen fortzuführen. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit den Gruppen F1, MKS und MKK ein Teststand mit einem supraleitenden Magneten aufgebaut, der ein Feld bis zu 5 T erzeugt. Der Magnet wurde im Zuge der HERA-Umbauten beim ZEUS-Experiment ausgebaut und in der HERA-Kältehalle in den Kühlkreislauf inte-



Abbildung 52: Test-TPC in der Öffnung des supraleitenden Magneten.

griert und wieder in Betrieb genommen. Abbildung 52 zeigt einen Teil des Magneten zusammen mit einer Test-TPC bei den ersten Messungen. Die Testkammer samt Messelektronik wurde von einer Aachener Partnergruppe zum Studium des Ladungstransfers in den GEM-Strukturen gebaut.

Die gemeinsam durchgeführten Messungen der verschiedenen Ionisationsströme als Funktion des Magnetfelds sind in Abbildung 53 dargestellt. Sie sind im Be-

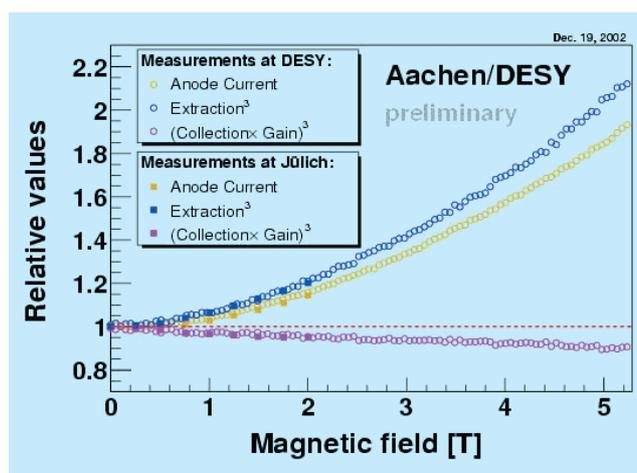


Abbildung 53: Ionisationsströme in der Test-TPC als Funktion des Magnetfelds (relative Werte bezogen auf $B = 0$). Der Anodenstrom (mittlere Kurve) ist ein Maß für die effektive Verstärkung der GEM-Struktur.

reich niedriger Felder in Übereinstimmung mit Messungen an einem normalleitenden Magneten.

Eine wesentliche Aussage dieser ersten Daten ist, dass die effektive Verstärkung der untersuchten GEM-Struktur auch im Bereich des für den TESLA-Detektor vorgesehenen Feldes von 4 T mit der Feldstärke zunimmt und damit deutlichere Signale liefert. Dies ist am Anstieg des Anodenstroms (mittlere Kurve) zu erkennen, die anderen Kurven stellen Details des Ladungstransfers dar. Weitere, noch nicht abgeschlossene Messungen werden darüber Auskunft geben, ob der unerwünschte Ionenrückfluss bei ausreichender Verstärkung klein genug gehalten werden kann.

Eine weitere Test-TPC, mit der die Spurauflösung im 4-T-Feld studiert werden kann, wird derzeit bei DESY in Leichtbauweise gefertigt, wie sie für den späteren großen Detektor erforderlich ist. Außerdem ist bereits geplant, dass weitere Testkammern, die an den europäischen und amerikanischen Partnerinstituten der internationalen Linear-Collider-TPC-Gruppe gebaut wurden, zu Messungen im Magneten installiert werden.

Hadron-Kalorimeter

Ziel des Detektors ist es, alle Teilchen, die in einem Ereignis produziert worden sind, möglichst einzeln zu rekonstruieren, und zwar sowohl geladene als auch neutrale. Der Anspruch, damit auch die innere Struktur von dichten Jets aufzulösen, stellt eine ganz besondere Herausforderung an die Kalorimeter dar. Sie müssen eine bisher unerreichte Granularität sowohl entlang der Teilchenrichtungen als auch senkrecht dazu aufweisen, um geladene von neutralen Teilchen zu trennen und im Spurdetektor gemessenen Trajektorien zuzuordnen. Mit solchen „Energy Flow“-Algorithmen lässt sich die Energieauflösung für Jets erheblich verbessern, da man dann für die typischerweise 60% der Energie, die auf geladene Teilchen fällt, von der überlegenen Impulsauflösung der TPC profitiert und auch für den im elektromagnetischen Kalorimeter identifizierten Photon-Anteil die Präzision dieser Komponente optimal nutzt. Damit kommt der bildgebenden („imaging“) Funktion eine vergleichbar große Bedeutung zu wie der intrinsischen Energieauflösung für einzelne Teilchen. Allerdings liefert selbst im Idealfall perfekter Teilchenidentifikation der kleine Anteil neutraler Hadronen, der

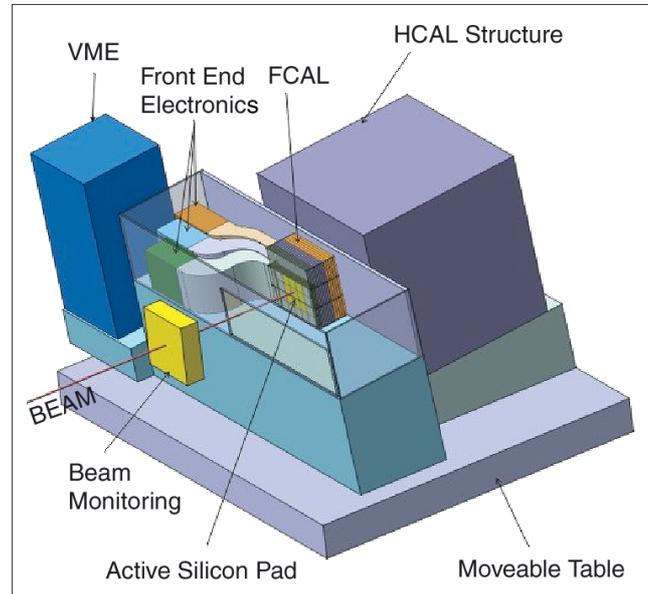


Abbildung 54: Geplanter Teststrahl-Aufbau des elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter-Prototyps.

nur im Hadron-Kalorimeter gemessen wird, noch den dominanten Beitrag zur Jetenergieauflösung.

Für das Hadron-Kalorimeter des TESLA-Detektors werden zwei Varianten diskutiert.

Das Tile-HCAL basiert auf der bereits erprobten Technologie eines Sandwich-Kalorimeters mit Eisen-Absorber und Szintillator-Kacheln („Tiles“). Allerdings stellt die hohe Granularität mit $5 \times 5 \text{ cm}^2$ eine Extrapolation in noch unbekanntes Gebiet dar. Die Gruppe FLC arbeitet hier zusammen mit russischen und tschechischen Partnerinstituten an der Optimierung des Systems aus Szintillator, Glasfaser-Auslese und Photo-Detektor. Die im letzten Jahr berichteten Studien zur Lichtausbeute wurden systematisch fortgeführt und im vergangenen Herbst vom PRC anerkennend begutachtet.

Eine noch stärkere Betonung der Ortsauflösung stellt die zweite Variante dar: das digitale Kalorimeter hat 1 cm^2 kleine Zellen, aber dafür werden die etwa 50 Millionen Kanäle aus Kostengründen nur binär ausgelesen. Für die Auslese kommen verschiedene Techniken in Frage: Szintillatoren, GEM-Folien oder so genannte „Resistive Plate Chambers“. Simulationsstudien deuten an,

dass sich mit diesem Detektorkonzept durchaus kompetitive Energieauflösungen auch für einzelne Teilchen erreichen lassen.

Beide Optionen werden im Rahmen der CALICE-Kollaboration als Teile eines integrierten Systems aus elektromagnetischem und hadronischem Kalorimeter verfolgt. Die internationale Gruppe – 168 Wissenschaftler aus 9 Ländern aller 3 Regionen – bereitet einen Strahltest mit einem solchen System im Vollmaßstab vor. Dazu wird ein Kalorimetervolumen von 1 m^3 mit mehreren 100 000 Auslesekanälen bestückt werden. Der geplante Aufbau ist in Abbildung 54 dargestellt.

Das Ziel ist, neben der Erprobung der Technologien, realistische Daten von hochauflösenden Hadron-Kalorimetern im Zusammenspiel mit dem elektromagnetischen Teil zu erhalten, um so die Simulationen zu validieren, die zur weiteren Optimierung des Detektors und zur Fortentwicklung der Energy Flow-Algorithmen nötig sind.

Software-Entwicklung

Bei der Vorbereitung des TESLA-Programms stehen zwei Bestrebungen im Mittelpunkt der Software-Aktivitäten: zum einen geht es darum, eine modernen Standards entsprechende, auf Objekt-orientierten Technologien basierende Umgebung für die Simulation und Rekonstruktion der Physik-Ereignisse zu schaffen, die eine tragfähige Grundlage für die eigentliche Experimentierphase bildet. Zum anderen werden Werkzeuge zur detaillierten Detektorsimulation benötigt, um die bisher meist auf Parametrisierungen beruhenden Studien zum Physikpotential in kritischen Fällen zu prüfen bzw. zu erhärten, und um die Rekonstruktionsalgorithmen weiterzuentwickeln.

Diese Entwicklungslinien miteinander zu verbinden ist wichtig, um eine möglichst fehlerfreie Übertragung der bereits entwickelten Methoden zu gewährleisten. Ein wesentlicher Schritt dahin gelang kürzlich. Die von französischen Gruppen bereits im Objekt-orientierten

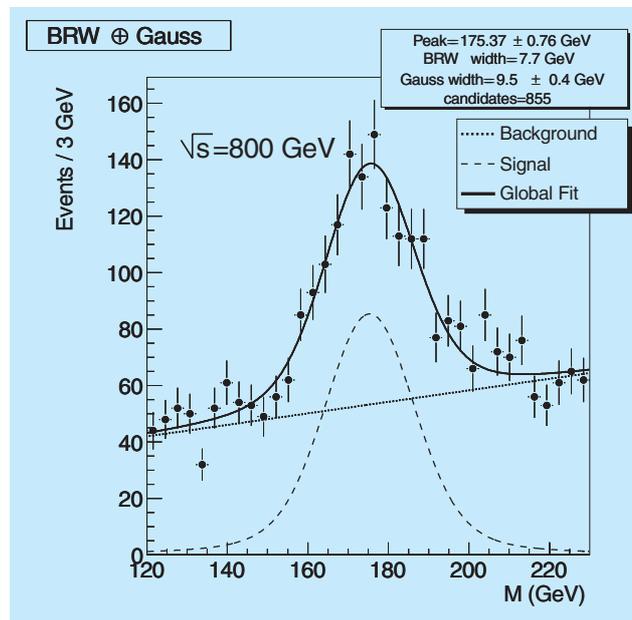


Abbildung 55: Invariante 3-Jet-Masse mit Top-Signal.

GEANT4-Rahmen entwickelte Simulations-Software wurde mit dem mit starker DESY-Beteiligung erstellten, FORTRAN-basierten Rekonstruktionsprogramm kombiniert. Damit steht die moderne Simulation verschiedener Detektorvarianten für vergleichende Physikstudien zur Verfügung. Diese Arbeiten werden in enger Kooperation zwischen den Gruppen FLC und IT ausgeführt.

Eine Physikstudie, bei der es auf die Qualität der Energy Flow-Analyse und damit auf detaillierte Detektorsimulation besonders ankommt, ist in Abbildung 55 gezeigt. Dargestellt ist die Messung der Top-Quark-Masse in $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ Ereignissen, in denen beide Quarks in je drei Hadron-Jets zerfallen (siehe auch Abb. 49).

Die Top-Quark-Masse geht in viele Berechnungen im Standardmodell ein; ihre präzise Messung ist ein zentraler Punkt im TESLA-Programm und nur ein Beispiel, das die Bedeutung eines leistungsfähigen Detektors mit entsprechender Software unterstreicht.

Theoretische Physik

Sprecher: F. Schrempp

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

- HERA Physik und QCD,
- Gittereichtheorien,
- Flavour-Physik bei B-Mesonen,
- Physik bei TESLA,
- Neutrino-Physik und Kosmologie,
- Vereinheitlichte Theorien,
- Quantengravitation.

HERA Physik und QCD

„Small-x“ Physik und Saturationsmodelle

Ein umfassender Überblick über den gegenwärtigen Stand des Verständnisses der QCD im Bereich der „small-x“ Physik ist in [DESY 02-041] enthalten; dieser Bericht ist das Resultat eines Workshops in Lund, bei dem Theoretiker aus verschiedenen Ländern ihr Wissen zusammengetragen haben. Zur Beschreibung von HERA-Daten im Bereich des Übergangs von störungstheoretischer QCD zur nichtstörungstheoretischen starken Wechselwirkung hat sich das Saturationsmodell von Golec-Biernat und Wüsthoff als sehr erfolgreich erwiesen. In [DESY 02-037] wird eine Weiterentwicklung dieses Modells beschrieben, die zu einer wesentlichen Verbesserung in der Beschreibung der Daten führt, insbesondere im Bereich größerer Q^2 . Ein viel versprechender Versuch, die Idee der Saturation auch in Hadron-Hadron Streuprozessen zu testen, wurde durchgeführt [DESY 02-219]. Die bei HERA gewonnenen Erkenntnisse zum Verhalten der Gluondichte des

Protons bei kleinen x -Werten erlauben es auch, den Fluss atmosphärischer Neutrinos aus Charm-Zerfällen abzuschätzen [DESY 02-227].

NLO Rechnungen

Im Rahmen der störungstheoretischen QCD wird der Regge Limes durch das BFKL-Pomeron beschrieben. Die Gültigkeit dieser Vorhersage ist seit mehreren Jahren in verschiedenen Streuprozessen untersucht worden (Vorwärts-Jets bei HERA, Mueller-Navelet-Jets am Tevatron und $\gamma^*\gamma^*$ -Streuung bei LEP). Dabei hat sich die Notwendigkeit gezeigt, die theoretischen Vorhersagen auch in nächstführender Ordnung („next-to-leading order“ NLO) zu berechnen. Für den Integralkern des BFKL-Pomerons liegen die Resultate seit einigen Jahren vor, während sie für die Ankopplung des BFKL-Pomerons an das Photon oder an die Jets bisher nicht zur Verfügung gestanden haben. Für die Kopplung an die Jets sind die analytischen Rechnungen jetzt abgeschlossen worden [DESY 02-090]. Zur noch nicht abgeschlossenen Berechnung des NLO-Photon-Impakt-Faktors sind neue Teilresultate veröffentlicht worden [DESY 02-114].

Physik des Photons

Der Wert der starken Kopplungskonstanten α_s wurde erstmals aus den endgültigen Daten zur Photonstrukturfunktion bei PETRA, TRISTAN und LEP bestimmt. Der neue Wert

$$\alpha_s(m_Z) = 0.1198 \pm 0.0028(\text{exp})_{-0.0046}^{+0.0034}(\text{theor})$$

stimmt mit bisherigen Analysen gut überein und erreicht eine ähnlich hohe Genauigkeit [DESY 02-052].

In einer Übersichtsarbeit wurde das aktuelle theoretische Wissen über Photonen und die Produktion von

Jets, leichten und schweren Hadronen, Quarkonia und prompten Photonen in Photon-Photon- und Photon-Hadron-Kollisionen zusammengefasst und mit den aktuellsten Daten von TRISTAN, LEP und HERA verglichen [DESY 02-086]. Virtuelle und polarisierte Photonen sowie die Hadroproduktion von Photonen wurden dabei ebenfalls berücksichtigt.

Schwere Quarks

Die Zerfallsbreite des Top-Quarks ist im Rahmen des Standardmodells so groß, dass Hadronisierungseffekte vernachlässigt werden können und das Top-Quark als quasifreies Fermion behandelt werden kann. Insbesondere kann aus der Winkelverteilung der Zerfallsprodukte die Polarisation des Top-Quarks rekonstruiert werden. Für hadronische Zerfälle polarisierter Top-Quarks wurden die QCD Korrekturen zur Winkelverteilung verschiedener Zerfallsprodukte berechnet [DESY 02-055]. Ein Vergleich dieser Vorhersagen mit zu erwartenden Daten zur Top-Produktion an Hadron- und Lepton-Beschleunigern wird eine genaue Analyse der Wechselwirkungen des Top-Quarks ermöglichen.

Nichtrelativistische QCD

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz so genannter Farboktett-Prozesse in der Natur vorher, das heißt schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Der im Rahmen dieser Theorie vorhergesagte Wirkungsquerschnitt für die inklusive Charmonium-Erzeugung in tiefunelastischer νN -Streuung wurde mit CHORUS-Daten verglichen [DESY 02-009]. Ferner wurden Vorhersagen für die assoziierte Erzeugung von Charmonia und elektroschwachen Bosonen bei TESLA, THERA, Tevatron und LHC gemacht [DESY 02-101].

Die nichtrelativistische Schwellendynamik des Top-Antitop-Systems kann wegen der Instabilität des Top-Quarks weitgehend störungstheoretisch beschrieben werden. Dies geschieht zweckmäßigerweise mit Hilfe der Potential-NRQCD (pNRQCD), einer effektiven

Feldtheorie, welche aus der NRQCD durch Ausintegration der weichen Moden und Potential-Gluonen hervorgeht. Die pNRQCD wurde nun in der dritten Störungsordnung formuliert [DESY 02-012]. So konnten Energiespektrum und Erzeugungsrate des Top-Antitop-Systems in dieser Ordnung bis auf die bislang unbekannte Korrektur zum statischen Interquarkpotential berechnet werden [DESY 02-134].

Instantonen und Saturation

ep-Streuexperimente bei kleinem Bjorken- x machen erstmals ein Regime der QCD zugänglich, in dem die Eichkopplung α_s klein ist, die Partondichten aber so groß werden, dass die übliche Störungstheorie an ihre Grenzen stößt. Während einerseits tatsächlich ein starkes Anwachsen der Gluondichte im Bereich kleiner x bei HERA gefunden wurde, gab es andererseits viel Diskussion über die Natur des Mechanismus, der schließlich zur erwarteten „Saturation“ der Dichten führt. Ein neuerer viel diskutierter Vorschlag ist, das Saturationsphänomen mit dem „Farbglas-Kondensat“ zu assoziieren, einem Vielteilchen-Quantenzustand mit hoher Besetzungszahl, der als starkes klassisches Feld angesehen werden kann.

Als konkrete mögliche Realisierung eines nicht-perturbativen, auf starken klassischen Gluonfeldern beruhenden QCD-Mechanismus wurde das explizit bekannte Instanton-Eichfeld ($\propto 1/g_s$) ausführlich untersucht. Mit Hilfe von Gitterergebnissen konnte in der Tat gezeigt werden, dass Saturation für die Streuung eines $q\bar{q}$ -Farbdipols am Proton in einem Instanton-Hintergrund erfolgt. Zwei unabhängige Strategien wurden betrachtet und führten zu konsistenten Ergebnissen: Einerseits wurde von den bereits bekannten Ergebnissen der Instanton-Störungstheorie ausgegangen [DESY 02-093, 094]; andererseits wurde die $(q\bar{q})p$ -Streuung im nicht-abelschen Eikonalformalismus in Form einer Wechselwirkung von Wilson-Loops im Instanton-Hintergrund analysiert [DESY 02-220]. In beiden Fällen bestimmt die auf dem Gitter gemessene, wohldefinierte mittlere Instantongröße $\langle \rho \rangle \approx 0.5$ fm die Saturationsskala. Im entsprechenden Dipolwirkungsquerschnitt erkennt man einen „Wettbewerb“ zwischen der $q\bar{q}$ -Dipolgröße r einerseits und der Größenskala

$\langle \rho \rangle$ des Hintergrund-Instantons andererseits. Es ergibt sich ein anschaulich geometrisches Bild [DESY 02-093, 094]: Nimmt die Dipolgröße r hadronische Dimensionen an, $r \geq \langle \rho \rangle$, so saturiert der Dipolwirkungsquerschnitt zu einem Wert proportional der dem Hintergrund-Instanton entsprechenden Fläche $\pi \langle \rho \rangle^2$. Für kleine Werte von r dominiert hingegen die Fläche πr^2 des $q\bar{q}$ -Dipols, das heißt man findet die erwartete „Farbtransparenz“ im Grenzwert verschwindender r wieder.

QCD am Hadron Collider

Die diffraktive Produktion von Higgs-Bosonen an Hadron-Collidern ist von besonderem Interesse, da der reduzierte Untergrund den Nachweis des Higgs-Bosons sehr erleichtern würde. Die entscheidende Frage ist daher, ob der Produktionswirkungsquerschnitt groß genug ist. Das „Soft Colour Interaction Model“, das sich bereits früher bei der diffraktiven Streuung bei HERA und am Tevatron als erfolgreich erwiesen hat, sagt voraus, dass die diffraktive Higgs-Produktion am Tevatron nur zu einigen wenigen Ereignissen führen kann, während die Ereignisrate am LHC wesentlich aussichtsreicher sein wird [hep-ph/0203267].

Wegen seiner deutlichen experimentellen Signatur ist, trotz seiner starken Unterdrückung, der Zerfallskanal $H \rightarrow \gamma\gamma$ von besonderem Interesse. Es wurde jedoch gezeigt, dass die Untergrundprozesse $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ und $gg \rightarrow \gamma\gamma$ mit prompten Photonen diesen Zerfall immer überdecken; daher müssen andere Zerfälle des Higgs betrachtet werden [hep-ph/0210408]. Andererseits kann der Nachweis solcher prompter Photonen in $gg \rightarrow \gamma\gamma$ einen grundlegenden Baustein der diffraktiven Higgs Produktion testen, nämlich die geschlossene Quark-Schleife.

Mit Hilfe des Lund String-Modells für die Hadronisierung lässt sich die Polarisation von Λ -Teilchen erklären. In einer neuen Untersuchung wurde dieser Mechanismus auf den Niederenergie-Prozess $p\bar{p} \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ angewandt, und mit Hilfe einer Verallgemeinerung des Diquark-Modells konnten Winkelverteilung, Polarisation und die Spin-Korrelation zwischen Λ und $\bar{\Lambda}$ erfolgreich beschrieben werden [hep-ph/0204022]. Zusammen mit früheren Resultaten zeigt dies, dass der Polarisationsmechanismus dieses Modells die Polari-

sation des Λ sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Energien richtig beschreibt; er ist eine natürliche Folge der Tatsache, dass das Aufbrechen eines Strings ein lokaler Effekt ist und nicht wesentlich abhängt von der Gesamtenergie und Länge des Strings.

Gittereichtheorie

Die Arbeiten im Bereich Gittereichtheorien konzentrierten sich auf die Themen Supersymmetrie auf dem Gitter, Entwicklung von Simulationsalgorithmen für dynamische Fermionen sowie die Simulation von Gitter-Fermionen mit exakter chiraler Symmetrie. Eine wichtige Anwendung war die Berechnung von Kopplungskonstanten der effektiven chiralen Lagrangedichte, der so genannten „Gasser-Leutwyler-Koeffizienten“, deren Werte die Bestimmung einiger fundamentaler Größen des Standardmodells ermöglichen.

Supersymmetrie auf dem Gitter

Bei der Gitter-Regularisierung supersymmetrischer Theorien wird die Supersymmetrie durch Gitter-Artefakte gebrochen. Es wird erwartet, dass die Supersymmetrie im Kontinuumslimes restauriert wird. Daraus folgt, dass die supersymmetrischen Ward-Takahashi-Identitäten (SWTI) bei genügend kleinen Gitterkonstanten in guter Näherung erfüllt werden müssen. Die DESY-Münster-Roma-Kollaboration hat die SWTIs in der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie untersucht [DESY 01-141]. Die Resultate zeigen, dass in den numerischen Simulationen die SWTIs erwartungsgemäß relativ gut erfüllt sind. Der allgemeine Fortschritt der letzten Jahre bei den numerischen Untersuchungen der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie wurde in einem Review-Artikel zusammengefasst [DESY 01-214].

Leichte dynamische Quarks

In einer ausführlichen numerischen Studie wurden die Simulationskosten für die QCD mit dynamischen

Quarks als Funktion der Quarkmasse untersucht, unter Verwendung des so genannten „Two-Step Multi-Boson Algorithmus“ (TSMB) [DESY 02-083]. Die Abhängigkeit des benötigten Aufwands als Funktion des Gitter-Volumens wurde auch in einigen Fällen bestimmt [DESY 02-146]. Diese Resultate sind für die Planung zukünftiger numerischer Simulationen nützlich. Kostenabschätzungen für die vielfach verwendeten HMC- und PHMC-Algorithmen sowie eine Reihe von fermionischen Formulierungen (improved staggered, Domain Wall, Overlap, Wilson) wurden ebenfalls diskutiert [hep-lat/0203021].

Eine wichtige Bedingung dafür, dass die systematischen Fehler in QCD-Simulationen kontrolliert werden können, ist, dass die dynamischen Quarkmassen klein genug für die Anwendung der chiralen Störungstheorie sein müssen. Es besteht der allgemeine Konsens, dass hierzu Daten bei wesentlich kleineren Quarkmassen nötig sind als bislang typischerweise simuliert worden sind. Die so genannten chiralen Logarithmen im Bereich leichter Quarkmassen verursachen starke Abweichungen vom naiven chiralen Verhalten vieler physikalischer Größen, deren Berücksichtigung für eine korrekte Extrapolation zu physikalischen Werten der Quarkmassen jedoch wesentlich ist [hep-lat/0209086]. Die numerischen Daten der qq+q-Kollaboration haben das typische qualitative Verhalten mit chiralen Logarithmen zum ersten Mal gezeigt [DESY 02-083, 146]. Die CPPACS- und die JLQCD-Kollaboration in Japan konnten dieses wichtige Ziel trotz eines wesentlich höheren Aufwands an Rechenzeit bislang noch nicht erreichen.

Die bisherigen Simulationen mit leichten Quarks wurden mit der Wilson-Wirkung durchgeführt. Die Möglichkeit der Anwendung des TSMB Algorithmus für verbesserte Wirkungen wurde ebenfalls untersucht [DESY 01-187, 02-044].

Quarkmassen

Der gegenwärtige Stand der Bestimmung der Quarkmassen aus Gittersimulationen wurde in Übersichtsartikeln und -vorträgen erörtert [DESY 02-030, 164]. Die Masse des strange-Quarks ist demnach die am genauesten bekannte Größe in der so genannten „quenched“ Approximation. Eine weitergehende signifikante Re-

duktion der systematischen Fehler erfordert die Quantifizierung der Effekte dynamischer Quarks.

Die Frage nach der Masse des up-Quarks kann durch Bestimmung der Gasser-Leutwyler-Koeffizienten beantwortet werden. Bisherige Untersuchungen, die mit Massen in der Nähe der strange-Quarkmasse durchgeführt wurden, weisen darauf hin, dass das up-Quark eine nicht-verschwindende Masse hat. Einen endgültigen Schluss kann man jedoch aus den vorliegenden Ergebnissen noch nicht ziehen. Weitere Untersuchungen bei kleineren Quarkmassen sind notwendig, um diese Frage schlüssig zu beantworten [DESY 02-164]. Die Beobachtung der chiralen Logarithmen in Simulationen mit dem TSMB-Algorithmus [DESY 02-083, 146] macht den Weg frei für die genaue numerische Bestimmung der Gasser-Leutwyler-Koeffizienten der chiralen Lagrangefunktion.

Chirale Fermionen im ϵ -Regime

Das so genannte ϵ -Regime der QCD wird für beliebig kleine Quarkmassen im endlichen Volumen realisiert und kann systematisch durch chirale Störungstheorie beschrieben werden. Insbesondere lassen sich analytische Ausdrücke für das Skalenverhalten von Größen wie dem Quark-Kondensat ableiten. Aus Gitterdaten können mit Hilfe dieser Ausdrücke die Gasser-Leutwyler-Koeffizienten im unendlichen Volumen bestimmt werden.

Eine methodologisch konsistente Beschreibung des ϵ -Regimes auf dem Gitter wird durch die Verwendung von Gitter-Fermionen mit exakter chiraler Symmetrie ermöglicht. Numerische Simulationen werden jedoch erschwert durch die Präsenz exakter Nullmoden und kleiner Eigenwerte des entsprechenden Dirac-Operators, gegen die die verwendeten, beliebig kleinen Quarkmassen keinen ausreichenden Schutz bieten. In einer Arbeit wurden einige Techniken vorgestellt, mit deren Hilfe sich das ϵ -Regime wesentlich effizienter simulieren lässt [DESY 02-212]. Insbesondere lässt sich ein Faktor 8 in der Berechnung von Quarkpropagatoren im ϵ -Regime gewinnen. Die Anwendung auf die Bestimmung von Eigenwertverteilungen und der Vergleich mit der „Random Matrix Theorie“ sowie die Berechnung von Matrixelementen des effektiven schwachen „Hamiltonians“ für Kaon-Zerfälle wird vorbereitet.

Nutzung von PC Clustern

Ein wichtiges Hilfsmittel für die Arbeit der Gittergruppe ist das im Januar 2002 in Hamburg installierte PC Cluster mit 32 Knoten (Abb. 56), welche im August 2003 mit je einem weiteren Prozessor aufgerüstet worden sind.

Ein erheblicher Teil der Arbeit bestand in der Erstellung von Programmbibliotheken zur effizienten Simulation von Ginsparg-Wilson Fermionen in der „quenched“ Approximation sowie von dynamischen Wilson-Fermionen mit dem TSMB-Algorithmus. Als essentiell erwies sich hierbei die Benutzung der SSE/SSE2 Register, die eine Vektorisierung von zentralen Routinen ermöglichen. Auf diese Weise konnte eine Beschleunigung des Codes um einen Faktor 4 („single precision“) bzw. einen Faktor 2 („double precision“) erreicht werden. Die erstellten Programmteile wurden teilweise im Rahmen der Arbeit der Evaluierungsgruppe des „Lattice Forums“ verwendet, um die Leistung verschiedener Rechnerplattformen zu vergleichen.

B-Physik

Dank der erfolgreichen Experimente BABAR und BELLE durchläuft die B-Meson Physik eine rasante Entwicklung. Diese Experimente haben vor allem neue und genauere Messungen der Materie-Antimaterie Asymmetrie (auch CP Asymmetrie genannt) in B Zerfällen und den seltenen B-Mesonen Zerfällen geliefert. Die Präzisionsmessungen auf diesem Gebiet erlauben es, ein quantitatives Bild der Flavourübergänge innerhalb des Standardmodells zu gewinnen, und sind gleichzeitig für die Suche nach neuer Physik jenseits des Standardmodells von enormer Wichtigkeit. Diese Aspekte der Flavourphysik sind auch Bestandteil der seit einigen Jahren laufenden und auch im Jahr 2002 fortgesetzten theoretischen Untersuchungen in der Gruppe Theorie und am II. Institut der theoretischen Physik der Universität Hamburg. Wesentliche Punkte dieser Untersuchungen, die im Jahr 2002 vorwiegend im Standardmodell und in supersymmetrischen Theorien durchgeführt wurden, sind in diesem Abschnitt zusammengefasst.



Abbildung 56: Das 32-Knoten PC Cluster bei DESY-Hamburg.

Die gemessene CP-Asymmetrie in den Zerfällen $B^0/B^{\pm} \rightarrow J/\psi K_S, B^0/B^{\pm} \rightarrow J/\psi K_L$, welche die erste Messung der CP Asymmetrie außerhalb der K-Mesonen darstellt, ermöglicht es, den inneren Winkel β im Unitaritätsdreieck zu bestimmen. Der aktuelle Mittelwert $\sin 2\beta = 0.734 \pm 0.054$ ist mit dessen indirekten Abschätzungen innerhalb des Standardmodells in sehr guter Übereinstimmung. Die Konsistenz der gemessenen CP Asymmetrien in B- und K-Mesonen mit dem Standardmodell führt zu dem Schluss, dass die CP Asymmetrie in Quarkübergängen durch die Phase in der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix dominiert ist [DESY 02-110]. Dennoch ist ein Beitrag der Physik jenseits des Standardmodells nicht ganz auszuschließen. Diese Möglichkeit wurde innerhalb der supersymmetrischen Modelle untersucht [DESY 02-085, 089]. Neben anderen Effekten sagen diese Modelle für die Zerfälle $B \rightarrow (X_d, \rho, \omega)\gamma$ Zerfallsraten und Asymmetrien vorher, die von denen des Standardmodells abweichen. Außerdem führen die supersymmetrischen Effekte zur indirekten Abschätzung der Winkel α und β im CKM-Unitaritätsdreieck, die von denen des Standardmodells abweichen können. Eine direkte Messung der Winkel α und β ist bis jetzt nicht gelungen, wird aber in der Zukunft von Experimenten an B-Fabriken sowie am Beschleuniger LHC (Large Hadron Collider) am CERN erwartet. Theoretische Vorschläge für die Bestimmung dieser Winkel mit Hilfe der Symmetrien im Flavour-

raum sowie mit Hilfe der Korrelationen in hadronischen Zerfällen $B \rightarrow \pi\pi$, $B \rightarrow K\pi$ und $B_s \rightarrow K^+K^-$ wurden unterbreitet [DESY 02-102, 040]. Ferner wurden die verschiedenen CP Asymmetrien innerhalb der B-Mesonen in Zusammenhang mit dem Zerfall $K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$ theoretisch untersucht [DESY-THESIS-2002-022].

Der seltene Zerfall $B \rightarrow X_s\gamma$ ist eine wichtige Quelle für die Untersuchung der Physik in so genannten elektromagnetischen Pinguin-Amplituden. Präzisionstheorie auf diesem Gebiet und die Messungen erlauben es, den Wert des CKM Matrixelements V_{ts} zu extrahieren. Der resultierende Wert $|V_{ts}| = (47 \pm 8) \times 10^{-3}$ ist mit dem genaueren Wert $|V_{ts}| = (41 \pm 2) \times 10^{-3}$, der sich mit Hilfe der CKM-Unitarität berechnen lässt, in Einklang. Die vorhandenen Messungen und die theoretisch erzielte Genauigkeit erlauben es, mögliche Abweichungen vom Standardmodell zu quantifizieren. Insbesondere die Zerfallsrate für $B \rightarrow X_s\gamma$ liefert nicht-triviale Schranken für die supersymmetrischen Modelle [DESY 01-217, 224]. Die exklusiven Zerfälle $B \rightarrow (K^*, K^{**})\gamma$ liefern wichtige Information über die Dynamik der Flavourübergänge; diese Zerfälle wurden theoretisch mit Hilfe der „Heavy Quark Effective Theory“ (HQET) und der Lichtkegel Summenregeln untersucht [DESY 02-047]. Die CKM-unterdrückten Zerfälle $B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma$ sind nicht nur für die Bestimmung des CKM Matrixelements $|V_{td}|$ sehr wichtig, sondern bieten sich auch als vielversprechende Prozesse für die Suche nach neuer Physik in $b \rightarrow d\gamma$ Übergängen an [DESY 02-089].

Inzwischen ist es den B-Fabrik Experimenten gelungen, auch die Zerfälle $B \rightarrow X_s\ell^+\ell^-$ und $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$, die durch die elektroschwachen Pinguin-Amplituden dominiert sind, zu messen. In einer vorangegangenen Arbeit, die sich für die Analyse der experimentellen Daten innerhalb des Standardmodells als sehr hilfreich erwiesen hat, wurden die Voraussagen für diese Zerfälle theoretisch verbessert [DESY 01-217]. Auch die Messungen auf diesem Gebiet sind mit dem Standardmodell in Einklang, jedoch lassen die experimentellen und verbleibenden theoretischen Unsicherheiten Spielraum für signifikante Abweichungen vom Standardmodell. Theoretische Analysen der vorhandenen Daten erlauben es, den relevanten Wilsonkoeffizienten in einer effektiven Theorie zu extrahieren. Durch

genauere Messungen des dileptonischen Massenspektrums sowie der Vorwärts-Rückwärts Asymmetrie in den Zerfällen $B \rightarrow (X_s, K^*)\ell^+\ell^-$ werden diese Koeffizienten festgelegt. Um die Abschätzungen im Rahmen des Standardmodells zu erhärten, sind Vorschläge unterbreitet worden, die es ermöglichen, mit Hilfe der HQET theoretische Unsicherheiten in den Zerfällen $B \rightarrow (K, K^*)\ell^+\ell^-$ zu reduzieren [DESY 02-005, 143, DESY-THESIS-2002-040].

Physik bei TESLA

Supersymmetrie

Standard Teilchenphysik wird durch eine Energieskala von etwa 100 GeV charakterisiert. Jedoch vermutet man, dass die Wurzeln für alle physikalischen Phänomene, die experimentell beobachtet werden, im Bereich der Planck-Länge von $\lambda_{\text{PL}} = 10^{-33}$ cm liegen, äquivalent zu Energien nahe der Planck-Skala von $M_{\text{PL}} = 10^{19}$ GeV.

Die Supersymmetrie (SUSY) baut eine stabile Brücke zwischen diesen weit voneinander entfernten Energieskalen. Diese Symmetrie ist jedoch nicht exakt, und der Mechanismus, der sie bricht, wird ebenfalls an dieser hohen Skala in einem verborgenen Sektor vermutet, der mittels der Gravitationswechselwirkung an unsere Eigen-Welt gekoppelt ist.

Um die fundamentalen Strukturen von Theorien bei Skalen nahe der Planck-Skala zu studieren, stehen uns nur wenige Instrumente zur Verfügung. Proton-Zerfall, Neutrino-Physik und Kosmologie könnten Licht auf diese Region werfen. Ein reiches Ensemble von Informationen könnten uns aber auch die Parameter supersymmetrischer Theorien zur Verfügung stellen, wenn sie in gut kontrollierter Form von Labor-Energien zur Planck-Skala extrapoliert werden. Kopplungen und Massen müssen jedoch sehr präzise gemessen werden, um die ungeheure Distanz von 13 bis 16 Größenordnungen in der Energie theoretisch zu überbrücken. Die erforderlichen Präzisionsexperimente lassen sich an Lepton Collidern im sub-TeV (TESLA) und im multi-TeV Bereich (CLIC) ausführen, wohingegen Hadron Collider nur unvollständige a-posteriori Tests erlauben.

Higgs-Bosonen

Wenn geladene Higgs-Bosonen (H^\pm), die in supersymmetrischen Theorien vorhergesagt werden, wegen ihrer hohen Masse bei TESLA nicht paarweise erzeugt werden können, dann stellen die Reaktionen $e^+e^- \rightarrow t\bar{b}H^-, \bar{t}bH^+$ für große Werte des Parameters $\tan\beta$, dem Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der beiden Higgs-Felder, den führenden Erzeugungsmechanismus dar. Für den Wirkungsquerschnitt dieses Prozesses wurden die QCD- bzw. SUSY-QCD-Korrekturen berechnet, um so eine zuverlässige Vorhersage zu gewinnen [DESY 02-057].

SUSY-Teilchenphänomenologie

In supersymmetrischen Theorien wird das Spektrum der fundamentalen Teilchen gegenüber dem Standardmodell (mehr als) verdoppelt. Jedem Teilchen im Standardmodell wird ein supersymmetrischer Partner zugeordnet, unterschieden um eine halbe Einheit des Spins. Supersymmetrische Teilchen müssen höhere Massen besitzen, wechselwirken jedoch mit denselben Kopplungsstärken wie Standardteilchen.

Der steile Anstieg der Exzitationskurven an der Schwelle ermöglicht es, die Massen von paarweise erzeugten supersymmetrischen Leptonen in e^+e^- Collidern mit einer Genauigkeit von einigen Promille zu bestimmen [DESY 02-176, 182]. Die sorgfältige Berechnung von Effekten, die durch die kurze Lebensdauer und Strahlungskorrekturen verursacht werden, ist dabei unabdingbar.

Im Rahmen des Minimalen Supersymmetrischen Standardmodells (MSSM) werden Gluino-Paare in der Elektron-Positron-Vernichtung über virtuelle Quark-Squark-Schleifen erzeugt, wobei aufgrund der destruktiven Interferenz verschiedener Diagramme hauptsächlich die stark mischenden Squarks der dritten Generation beitragen. Durch eine sorgfältige Analyse dieser Diagramme konnte das Potential linearer Elektron-Positron-Beschleuniger, wie zum Beispiel TESLA, für die Gluino-Paarproduktion untersucht werden. Dabei wurde für realistische Strahlpolarisationsgrade und unter Berücksichtigung aktueller Massengrenzen der Parameterraum des MSSM auf sichtbare Wirkungsquerschnitte hin untersucht und die Genauigkeit einer

Gluino-Massenbestimmung abgeschätzt [DESY 02-119].

Eine fundamentale Vorhersage, die auch bei gebrochener Supersymmetrie gilt, ist die Gleichheit der Yukawa-artigen Kopplungen zwischen Gauginos, Sfermionen und Fermionen einerseits und den entsprechenden Eichkopplungen zwischen Sfermionen bzw. Fermionen und Eichbosonen andererseits. Diese Vorhersage kann im QCD-Sektor des MSSM getestet werden durch Betrachtung der Raten für die Prozesse $e^+e^- \rightarrow \text{Squark}+\text{Antiquark}+\text{Gluino}$ und $e^+e^- \rightarrow \text{Squark}+\text{Antisquark}+\text{Gluon}$. Diese Raten wurden in nächstführender Ordnung in der starken Kopplung berechnet, um eine ausreichende Genauigkeit der Vorhersage zu gewährleisten [DESY 02-097].

Die Wellenfunktionen supersymmetrischer Teilchen sind infolge von quantenmechanischen Mischungseffekten von sehr komplexer Natur, besonders im Sektor der supersymmetrischen Partner der neutralen Eichbosonen γ, Z und der Higgs-Bosonen. Nichtsdestoweniger gelingt es, an Lepton Collidern ein vollständiges und detail-genaues Bild der Eigenschaften dieser Teilchen zu gewinnen [DESY 02-020].

Neben der direkten Produktion supersymmetrischer Teilchen können diese auch als virtuelle Korrekturen die Eigenschaften bekannter Teilchen verändern. Die Schleifenbeiträge von Charginos und Neutralinos zur W-Paarzeugung in der Elektron-Positron-Vernichtung unter Berücksichtigung CP-verletzender Phasen wurden untersucht [DESY 02-205]. Es zeigte sich, dass die Gaugino-Korrekturen im MSSM für longitudinale W-Bosonen über einem Prozent liegen können, während die CP-verletzenden Asymmetrien mit maximal 0.1% klein bleiben. Analog wurde für polarisierte Top-Quarks der Einfluss von Squarks und Gluinos auf die differentielle Zerfallsverteilung untersucht [DESY 02-095].

Physik nahe der Planck-Skala

Basierend auf Hochpräzisionsmessungen lassen sich die Kopplungen und Massen mit feldtheoretischen Methoden zu Energieskalen in die Nähe der Planck-Skala fortsetzen, an der sich die fundamentalen Wechselwirkungen vereinheitlichen. In der Supergravitation entwickeln sich die Massen auf diesen Punkt hin zu ei-

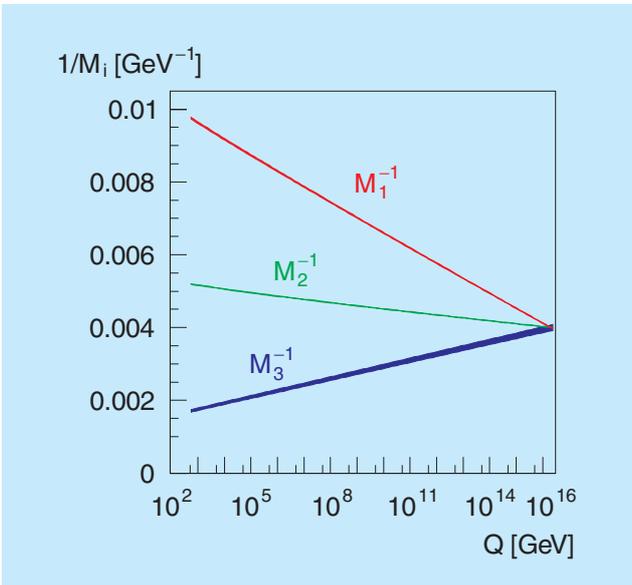


Abbildung 57: Evolution von Massenparametern in der Supergravitation von der elektroschwachen zur Vereinigungsskala.

nem universellen Wert [DESY 02-166, 175], wie es in Abbildung 57 vorhergesagt wird. Damit können Hochpräzisions-Instrumente wie TESLA und CLIC als Teleskope dienen, mit deren Hilfe die Struktur der Physik in Energieregionen nahe der Planck-Skala analysiert

Parameter	Ideal	Rekonstruiert
$m_{3/2}$	180	179.9 ± 0.4
$\langle S \rangle$	2	1.998 ± 0.006
$\langle T \rangle / m_{3/2}$	14	14.6 ± 0.2
$\sin \theta$	0.949	0.948 ± 0.001
g_s^2	0.5	0.501 ± 0.002
δ_{GS}	0	0.1 ± 0.4
n_L	-3	-2.94 ± 0.04
n_Q	0	0.02 ± 0.02
n_{H_1}	-1	-0.96 ± 0.06

Tabelle 3: Vergleich von rekonstruierten Werten mit den idealen fundamentalen Parametern in einer Superstring-induzierten effektiven Feldtheorie. Die Parameter kennzeichnen Massen, Werte von Feldern im Vakuum, Mischungen von Feldern und Kopplungen.

werden kann, wo die Teilchenphysik mit der Gravitation verbunden ist und die mikroskopischen Wurzeln der gesamten Physik liegen.

Das hohe Entdeckungspotential von e^+e^- Collidern im Bereich fundamentaler physikalischer Fragestellungen ist ebenfalls in der Analyse effektiver feldtheoretischer Parameter ersichtlich, wie sie aus Superstring-Theorien entwickelt werden. Ohne ins Detail zu gehen, zeigt der Vergleich von Idealwerten mit simulierten Messwerten von TESLA und CLIC in Tabelle 3, mit welcher hoher Präzision Superstring-induzierte Szenarien untersucht werden können.

Neutrino-Physik und Kosmologie

Die höchstenergetische kosmische Strahlung gibt möglicherweise einen Hinweis auf die Masse der niederenergetischsten Überbleibsel vom Urknall – der Neutrinos. Deren mittlere Dichte ist direkt proportional zur experimentell sehr gut bekannten mittleren Photondichte der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung und daher – theoretisch sehr verlässlich – zu 56 Neutrinos pro Kubikzentimeter und pro Neutrinospezies vorhergesagt. Ultrahochenergetische kosmische Neutrinos aus astrophysikalischen Quellen könnten sich bei den Resonanzenergien $E_{\nu_i}^{Res} = 4 \cdot 10^{21} \text{ eV} (\text{eV}/m_{\nu_i})$ mit den Urknallneutrinos vernichten und Z-Bosonen („Z-Bursts“) erzeugen, deren hadronische Zerfallsprodukte, insbesondere Protonen, möglicherweise den Hauptbestandteil der höchstenergetischen kosmischen Strahlung bilden.

Auf diese Weise könnte auch eines der größten Rätsel der kosmischen Strahlung gelöst werden. Dieses besteht in der Tatsache, dass eine signifikante Anzahl von kosmischen Strahlen mit Energien oberhalb von $4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ beobachtet wurde, obwohl das Spektrum einen starken Abfall zeigen sollte, da oberhalb dieser Energie Nukleonen einen sehr großen Energieverlust durch unelastische Wechselwirkungen mit den kosmischen Hintergrundphotonen erleiden. Das Energiespektrum der höchstenergetischen kosmischen Strahlen hängt stark von der Masse des schwersten Neutrinos ab, falls sie tatsächlich durch oben erwähnte Z-Bursts entstehen. Eine umfangreiche quantitative Untersuchung liefert einen Massenbereich von $0.08 \text{ eV} \leq m_{\nu_3} \leq 0.4 \text{ eV}$ für

das schwerste Neutrino [DESY 02-014, 145]. Dieser Massenbereich ist verträglich mit sonstigen experimentellen und kosmologischen Hinweisen über die Neutrinomassen. Die erforderlichen ultrahochenergetischen kosmischen Neutrinos sollten in naher Zukunft vom Neutrinoobservatorium AMANDA und vom Pierre Auger Luftschauerexperiment gesehen werden, sonst ist das Z-Burst-Szenario ausgeschlossen.

Massive Neutrinos können entweder Dirac- oder Majorana-Teilchen sein. Im letzteren Fall führen sie zu Prozessen, die die Leptonzahl verletzen, insbesondere dem neutrinolosen doppelten β -Zerfall. Schwere Majorana-Neutrinos sind auch die Basis für Modelle der Baryogenese durch die Erzeugung einer Lepton-Asymmetrie in der Frühphase des Universums. Eine detaillierte Untersuchung zeigte, dass dieser Mechanismus der Leptogenese die Summe der Quadrate der Neutrinomassen, die ein Maß für die gesamte Leptonzahl-Verletzung darstellt, stark einschränkt [DESY 02-058]. Zusammen mit der durch solare und atmosphärische Neutrinos gewonnenen Information über die Differenz der Quadrate von Neutrinomassen lässt sich daraus eine obere Schranke von 0.2 eV an alle Neutrinomassen ableiten [DESY 02-107], die restriktiver ist als andere in der Kosmologie und in Labor-Experimenten gewonnene Massenschranken. Einen allgemeinen Überblick über Neutrinophysik und Leptogenese geben die Vorlesungen [DESY 02-32].

Die Resultate der Experimente BOOMERanG und DASI geben zum ersten Mal Einblick in Details der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Rückschlüsse auf den Ursprung der Dichtefluktuationen zur Zeit der Entkopplung erlauben. Insbesondere die Skalenabhängigkeit des spektralen Index unterscheidet zwischen verschiedenen Modellen der Inflation. Eine Untersuchung der Hintergrundstrahlung zusammen mit Lyman- α und 2dF „Galaxy Redshift Survey“ Daten wurde für Modelle mit „laufender“ Inflatonmasse durchgeführt [DESY 02-136]. Im Fall niedriger Temperatur nach der Inflation, das heißt unterhalb von 10^6 GeV, könnte die dunkle Materie des Universums aus exotischen Teilchen, Axinos, den Superpartnern von Axionen, bestehen. Solche Teilchen haben sehr schwache Kopplungen an Materie und können in Squark-Zerfällen sowie in thermischen Quark-Squark-Streuprozessen erzeugt werden [DESY 02-80].

Vereinheitlichte Theorien

Im Zusammenhang mit der Evidenz für Neutrinomassen und -mischungen sind vereinheitlichte Theorien mit der Eichgruppe $SO(10)$ von aktuellem Interesse. Die Brechung dieser Symmetrie auf die Standardmodell-Eichgruppe kann auf einfache Weise mit Hilfe einer „Orbifold-Kompaktifizierung“ realisiert werden, ausgehend von einer supersymmetrischen Theorie in sechs Raumzeit-Dimensionen. Ein solches Modell wurde in [DESY 02-046] weiter entwickelt, insbesondere im Hinblick auf die Struktur der Anomalien in vier und sechs Dimensionen [DESY 02-115].

Interessante phänomenologische Implikationen haben fünf-dimensionale Theorien, in denen die vierdimensionale Raumzeit-Metrik von der fünften Dimension abhängt. Dies führt zu neuen Strukturen für Neutrinomassen und -mischungen [DESY 02-045]. Der Mechanismus, der in diesen Modellen zur Hierarchie von Fermi- und Planck-Massenskalen führt, kann auch eine sehr kleine kosmologische Konstante erklären [DESY 02-098].

Ein zentrales Problem vereinheitlichter Theorien ist die Vereinigung der Eichkopplungen des Standardmodells. Während in vier Dimensionen die Kopplungen logarithmisch von der Massenskala abhängen, treten in fünf und mehr Dimensionen zusätzlich potenzartige Korrekturen auf. Es wurde gezeigt, dass diese Korrekturen unter bestimmten Bedingungen im Rahmen einer feldtheoretischen Rechnung bestimmt werden können [DESY 02-218].

Schwarze Löcher gehören zu den bemerkenswertesten, aber auch mysteriösesten Objekten in der Physik. Seit Stephen Hawkings Vorhersage der Quantenevaporation Schwarzer Löcher spielen sie eine wichtige Rolle in jedem Versuch, eine Theorie der Quantengravitation aufzustellen. Für reale, astrophysikalische Schwarze Löcher ist der Hawking-Effekt jedoch so klein, dass eine Beobachtung ausgeschlossen scheint. Für mikroskopische Schwarze Löcher wäre der Effekt hingegen beobachtbar. Deren Produktion würde jedoch nach den gängigen Vorstellungen Schwerpunktsenergien von der Größenordnung der Planck-Skala $M_{\text{pl}} = 10^{19}$ GeV erfordern. Im Kontext von Theorien jenseits des Standardmodells, welche $D - 4 \geq 1$ extra Raumzeit-Dimensionen und eine neue fundamentale Planck-Skala

$M_D \geq 1$ TeV postulieren, erwartet man die Produktion von mikroskopischen Schwarzen Löchern jedoch schon bei Schwerpunktsenergien oberhalb M_D [DESY 02-053, 197, 159]. Die Sensitivität der Neutrinoobservatorien AMANDA und RICE für den Nachweis von mikroskopischen Schwarzen Löchern, welche möglicherweise in der Streuung von ultrahochenergetischen Neutrinos an Nukleonen im antarktischen Eis produziert werden, wurde intensiv untersucht [DESY 02-001]. Es wurde gezeigt, dass AMANDA und RICE schon vor der Inbetriebnahme des LHC starke Einschränkungen an die Produktion Schwarzer Löcher liefern und im günstigsten Fall eine erste Evidenz finden können.

Quantengravitation

Eins der großen Probleme der Quantenfeldtheorie ist ihre Vereinbarkeit mit dem Lokalitätsprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die allgemein kovariante Formulierung der Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Raumzeiten, einschließlich der Renormierung, die in den letzten Jahren von unserer Arbeitsgruppe durchgeführt worden ist, ist im generischen Fall einer Raumzeit mit trivialer Symmetriegruppe nicht lokal in dem Sinne, dass globale Information über die Struktur der Raumzeit in die Konstruktion eingeht. Dies führt zu dem Problem, dass Renormierungsvorschriften an verschiedenen Raumzeitpunkten nicht miteinander verglichen werden können. In einer kürzlich fertig gestellten Arbeit wurde ein neues Paradigma für Quantenfeldtheorien auf Mannigfaltigkeiten vorgeschlagen: Quantenfeldtheorien werden danach simultan auf allen Raumzeiten einer geeigneten Klasse (zum Beispiel global hyperbolisch) erklärt, so dass zu jeder

Einbettung einer Raumzeit in eine andere ein Homomorphismus der zugehörigen Operatoralgebren gehört [DESY 02-063]. Mathematisch handelt es sich bei dieser Struktur um einen kovarianten Funktor zwischen der Kategorie der Raumzeiten und der der Operatoralgebren.

In einer weiteren Arbeit wurde die störungstheoretische Struktur der klassischen Feldtheorie untersucht und das klassische Analogon der Schwinger-Dyson-Gleichung identifiziert. Hieraus ergab sich eine Neuformulierung und Verallgemeinerung der Ward-Identitäten [DESY 02-211]. Andere Arbeiten beschäftigten sich mit dem Unruh-Effekt [math-ph/0203011], einer nichtrelativistischen Version des Spin-Statistik-Theorems [quant-ph/0208151], dem Infrarotproblem [hep-th/0208230, 0211046] und der Unschärfe von Zeitmessungen [quant-ph/0207048]. Eine Anwendung der Positivitätsaussagen über den Energie-Impuls-Tensor auf gekrümmten Raumzeiten auf Probleme der Quantenoptik wurde diskutiert [quant-ph/0203027].

Neben diesen Untersuchungen, bei denen eine kontinuierliche Raumzeit vorausgesetzt wird, wurden die Arbeiten an einer Ausdehnung der Konzepte der Quantenfeldtheorie auf eine nichtkommutative Raumzeit fortgesetzt. Diese Arbeiten sind motiviert durch die Vermutung, dass die Nichtkommutativität der Raumzeitkoordinaten eine approximative Beschreibung von Quanteneffekten der Gravitation gestattet. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Fragen des geeigneten Lokalitätsbegriffs, der Eichinvarianz, der Renormierbarkeit und der Unitarität. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer konsequent an den Prinzipien der Quantenfeldtheorie ausgerichteten Definition der Theorie das Problem der Unitaritätsverletzung nicht auftritt [DESY 02-028].

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 in der medizinischen Forschung eingesetzt. Dabei wird das weite Spektrum der elektromagnetischen Strahlung vom sichtbaren Licht bis zum harten Röntgengebiet genutzt und ein Energiebereich von etwa 1 eV bis zu 300 keV überstrichen. Zusätzlich zum Betrieb der Nutzereinrichtung (Abb. 58) beteiligt sich HASYLAB an der Ausbildung von Studenten der Physik über eine enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg.

Die Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg wird durch die Fertigstellung des neuen Büro- und Laborgebäudes des Instituts für Laser-Physik der Universität Hamburg auf dem DESY-Gelände noch weiter intensiviert. Das Gebäude wird in der ersten Jahreshälfte 2003 bezogen werden. Im Frühjahr des Jahres 2003 wird eine C4 Stelle für Kurzzeit-Röntgenlaserphysik am Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg ausgeschrieben. Durch die Nutzung von Laserlicht im optischen und im Röntgenwellenlängenbereich werden starke Synergieeffekte erwartet.

Das GKSS Forschungszentrum in Geesthacht errichtet zusammen mit DESY und dem Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) einen neuen Messplatz für hochenergetische Synchrotronstrahlung im HASYLAB Gebäude 25c. Dort wird Röntgenstrahlung im Energiebereich von 30 bis 200 keV zur Verfügung gestellt. Die Schwerpunkte an diesem Messplatz liegen bei der Untersuchung von Eigenspannungen und Textur mit Hilfe von Diffraktionsmethoden und bei der Abbildung von Poren, Teilchen und Ausscheidungen durch

Tomographietechniken. Die GFZ wird eine MAX2002 Hochdruckanlage installieren und Diffraktionsexperimente an größeren Proben von geologischer Bedeutung durchführen. Alle diese Instrumente werden als Nutzereinrichtungen für Wissenschaftler von Universitäten, Forschungsinstituten und der Industrie zur Verfügung gestellt.

Die Struktur von Biomolekülen wird an neun Messplätzen von Wissenschaftlern der Hamburger Außenstelle des Europäischen Labors für Molekularbiologie (EMBL) und Wissenschaftlern dreier Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie der Max-Planck-Gesellschaft untersucht. Ein weiterer Messplatz für Proteinkristallographie wird von einem Konsortium, bestehend aus dem EMBL, dem Institut für Molekulare Biotechnologie (IMB) in Jena und dem Institut für Medizinische Biochemie und Molekularbiologie des Universitätskrankenhauses Eppendorf, betrieben. Das Engagement des EMBL für die Hamburger Außenstelle hat stark zugenommen. Die Zahl der zur Verfügung stehenden Stellen in der Außenstelle wird von 29 im Jahr 2000 auf 38 im Jahr 2003 steigen. Im Jahr 2002 ist die Büro- und Laborfläche um etwa 400 m² erweitert worden.

Für die Thetis Institut für Biomolekulare Naturstoffforschung GmbH (IBN) in Hamburg war 2002 das erste erfolgreiche Betriebsjahr. Thetis bietet der pharmazeutischen und agrochemischen Industrie Wirkstoffentwicklung in vollem Umfang an. Die drei Bruker Avance NMR Massenspektrometer, die bei 600 und 800 MHz arbeiten, wurden in Betrieb genommen.

Die Hauptschwerpunkte der industriellen Aktivitäten am HASYLAB – unterstützt durch unsere industrielle Servicegruppe – liegen im Bereich der Absorptionsspektroskopie an katalytischen Systemen mit einem steigenden Interesse an in-situ Untersuchungen kombiniert mit Diffraktionsexperimenten und anderen Echtzeit-Messmethoden. Die Randbedingungen für die

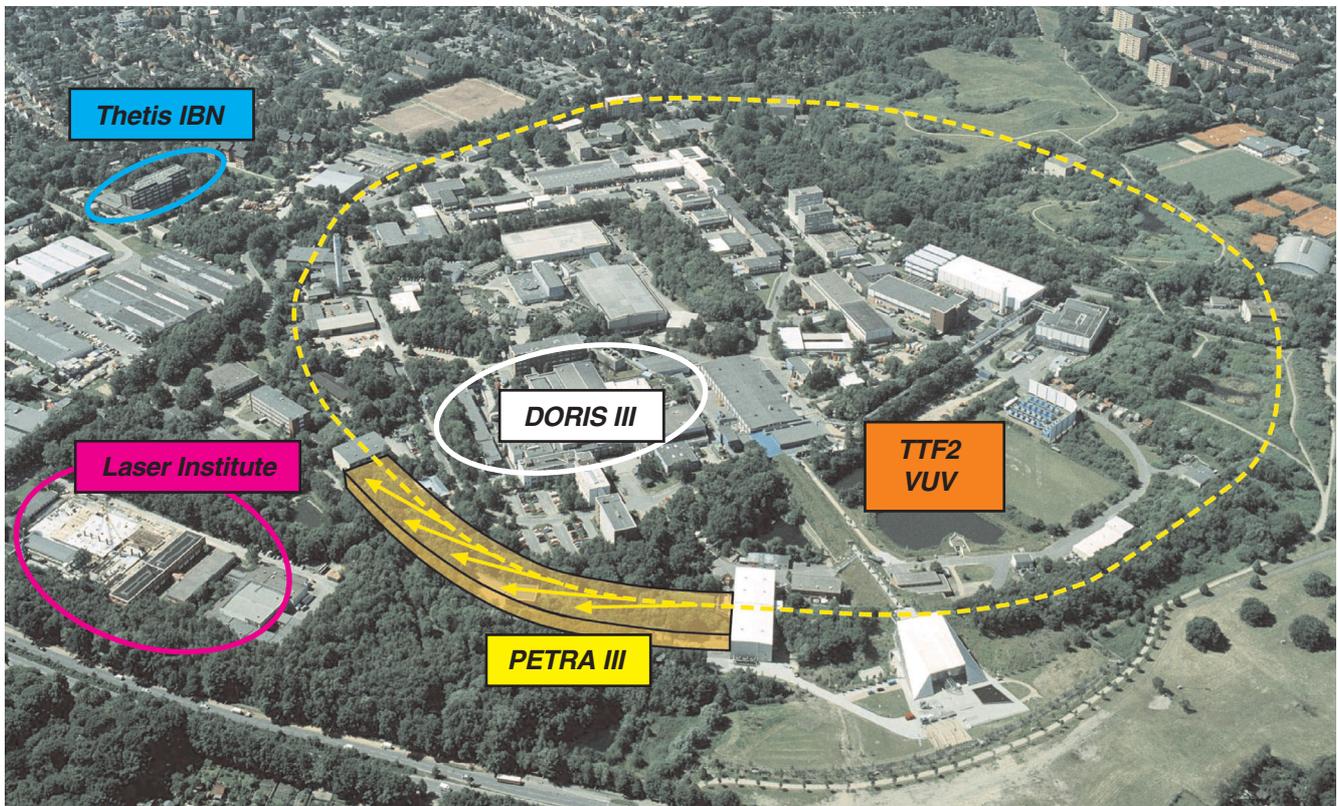


Abbildung 58: Forschung mit Photonen am DESY: Der DORIS III Speicherring für Synchrotronstrahlungsexperimente, die einen hohen Photonenfluss benötigen; der PETRA Speicherring, der ausgebaut werden soll, um 13 Undulatorstrahlführungen mit hoher Brillanz zur Verfügung zu stellen; die VUV FEL Nutzereinrichtung an der TESLA Test Facility, die Laserstrahlung mit Wellenlängen bis zu 6 nm liefert; das Institut für Laserphysik der Universität Hamburg (hier noch im Bau); die Thetis Institut für biomolekulare Naturstoffforschung GmbH (IBN).

industrielle Nutzung von HASYLAB Einrichtungen, besonders für Arbeiten, deren Ergebnisse nicht veröffentlicht werden, werden in einem neuen Faltblatt für Industrienutzer beschrieben, das im HASYLAB Sekretariat erhältlich ist. An den durch die EMBL Außenstelle und die Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie der MPG betriebenen Messplätzen ist der Anteil der Messzeit für Proteinkristallographie für industrielle Nutzer gestiegen.

Die Arbeiten an der Designstudie für den Ausbau des PETRA Speicherringes in eine erstklassige Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation wurden aufgenommen mit dem Ziel, den Technischen Design Report (TDR) für PETRA III bis zum Ende des Jahres

2003 zu erstellen. Um die Erfordernisse der potenziellen Nutzer zu ermitteln, wurden fünf Workshops organisiert mit den Themen:

- Materialwissenschaften (zusammen mit der GKSS),
- Strukturelle Molekularbiologie (zusammen mit dem EMBL, der MPG und der Universität Hamburg),
- Spektroskopie,
- Physik der kondensierten Materie,
- VUV und weiches Röntgengebiet.

Ungefähr 400 Teilnehmer besuchten diese Workshops, und die Resonanz der potenziellen Nutzerschaft war

sehr erfreulich. Ein erster Vorschlag zum Layout der Experimentierhalle und den verschiedenen an PETRA III zu realisierenden Messplätzen wird anlässlich eines öffentlichen Workshops im Sommer 2003 vorgestellt und diskutiert werden.

Die Phase I der SASE FEL Aktivitäten an der TESLA Test Facility ist erfolgreich abgeschlossen worden. Folgende Meilensteine wurden erreicht:

- Sättigung in einem Wellenlängenbereich von 80–120 nm,
- Peak Brilliance wie erwartet,
- 1 GW Spitzenleistung bei 100 nm in 50–100 fs langen Pulsen,
- 10^{13} Photonen in Blitzen von 50 fs Dauer in einem Fokus von 20 μm Durchmesser,
- Beobachtung der 2. Harmonischen (50 nm),
- alle experimentellen Beobachtungen sind in voller Übereinstimmung mit der SASE FEL Theorie,
- erste erfolgreiche Ablationsexperimente und Studien von nichtlinearen Effekten in freien Clustern und Atomen.

Durch Veränderung der Kompression des Elektronenbunches im TTF1 Linearbeschleuniger konnte die Pulsdauer in einem Bereich zwischen 40 und 100 fs variiert werden. Erste Computersimulationen zeigen die Möglichkeit auf, die Elektronendichteverteilung innerhalb eines Bunches so zu variieren, das eine kontrollierte Einstellung der Länge des Photonenpulses des FELs möglich ist. Wenn dieses Ziel erreicht werden kann, wird eine neue Dimension zu den einzigartigen Eigenschaften des Röntgen-Freie-Elektronen Lasers hinzugefügt.

Die ersten Experimente an freien Clustern am TTF1 VUV FEL haben weltweit großes Interesse erregt, auch bei den Nutzern von optischen Lasern. Durch Veränderung des experimentellen Aufbaus am TTF1 konnte auch die Ionisation von Edelgasatomen gezeigt werden. Bei Bestrahlung der Atome mit 12.8 eV Strahlung wurden Ionisationszustände bis zu Xe^{6+} beobachtet. Aus dem Vergleich mit verfügbaren Theorien wird geschlossen, dass die Ionisation stufenweise und nicht durch ein simultanes Ablösen aller abgestoßenen Elektronen von einem neutralen Atom stattfindet.

Großes Interesse ruft auch der TTF VUV FEL bei den Nutzern hervor, die Untersuchungen an „Warm Dense Matter“ durchführen. Daher fand bei DESY vom 3.–7. Juni 2002 die „International Conference on Warm Dense Matter“ statt mit 45 Vorträgen und einer Postersitzung, gefolgt vom „FEL Experiments Planning Workshop“.

Vom 25.–27. September 2002 wurden die ersten Projektanträge für den TTF2 VUV FEL vorgestellt und von ungefähr 50 Wissenschaftlern diskutiert; danach wurden die Anträge von dem erweiterten HASYLAB Project Review Panel für den XUV Spektralbereich begutachtet. HASYLAB erhielt nach dem im Frühjahr 2002 erfolgten Aufruf insgesamt 30 Projektanträge von knapp 200 Wissenschaftlern aus neun Ländern. Einer dieser Anträge vereinigt ein Dutzend mit Plasmaphysik befasste Experimente einschließlich Forschung an biologischen Proben.

In zehn Anträgen werden Experimente vorgeschlagen, die Proben in der Gasphase untersuchen. Sie reichen von der Grundlagenforschung der Wechselwirkung von intensiven VUV Pulsen mit Atomen, Molekülen und Clustern bis zur Spektroskopie an gespeicherten atomaren und molekularen Ionen, der Untersuchung von massenselektierten Clustern bis zu zeitaufgelösten Studien, die Pump-Probe Techniken benutzen.

Drei dieser Projekte umfassen vorwiegend technische Entwicklungen für die VUV FEL Facility, die sich mit Online-Messungen der absoluten Energie der FEL Strahlungspulse sowie ihrer zeitlichen Abfolge und Struktur befassen.

Mehrere Anträge beschäftigen sich mit Festkörperproben einschließlich Studien schneller Dynamik an Oberflächen, Dynamik magnetischer Eigenschaften, Nanospektroskopie und inelastischer Streuung. Die wissenschaftliche Qualität aller Anträge wurde als exzellent beurteilt.

Die wissenschaftlichen Programme des Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC) und des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY haben viel gemeinsam. Aufbauend auf einem starken Beschleunigerphysik-Programm verfolgen beide Labors zielstrebig wissenschaftliche Programme im Bereich der Teilchenphysik und der Synchrotronstrahlung. SLAC baut die „Linear Coherent Light Source“



Abbildung 59: Nach der Unterzeichnung des „Memorandum of Understanding“ zwischen dem Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) und dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY am 1. November 2002 in Washington, D.C. Von links nach rechts, vorn: A. Wagner (DESY), J. Dorfan (SLAC) und J.R. Schneider (DESY), hinten: J. Hastings, J. Galayda und K. Hodgson (SLAC).

(LCLS), einen SASE FEL, der im Jahr 2008 Strahlung von 0.15 nm Wellenlänge zur Verfügung stellen wird. Mit der „Sub-Picosecond Photon Source“ (SPPS) bietet sich die Möglichkeit für erste Experimente mit 80 fs langen Pulsen harter Röntgenstrahlung aus einer spontanen Undulatorquelle über einen Zeitraum von insgesamt 17 Monaten, beginnend im Mai nächsten Jahres bis zum Ende des Jahres 2005. Am DESY wird der TTF2 VUV FEL Strahlung mit Wellenlängen bis zu 6 nm liefern und im Jahr 2004 für Nutzer verfügbar sein. Große Hoffnungen werden auf die Realisierung des TESLA XFEL Labors im Großraum Hamburg bis zum Jahr 2011 gesetzt.

Um ihre Bemühungen zu koordinieren, unterzeichneten SLAC und DESY ein „Memorandum of Understanding“ über gemeinschaftliche wissenschaftliche Arbeiten mit dem Ziel, den TESLA-XFEL und das wissenschaftliche Programm der LCLS zu einem frühen Erfolg zu führen und um Forschung zu betreiben, die die einzigartigen Möglichkeiten der TTF2 und der SPPS Quellen ausschöpft (Abb. 59).

Die hohe Motivation der HASYLAB Mitarbeiter und der externen Nutzer wie auch die Unterstützung der

Forschung mit Synchrotronstrahlung durch alle Kollegen bei DESY sind die Basis für unseren Erfolg. Mit dem Speicherring DORIS III, den Ausbauplänen für PETRA III, dem VUV FEL am TTF2 und den großen Hoffnungen auf die Realisierung des TESLA-XFEL Labors in Hamburg, mit der engen Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg, der Außenstelle des EMBL, den Max-Planck-Arbeitsgruppen und der Thetis GmbH auf dem DESY-Gelände sowie dem Engagement des GKSS Forschungszentrums im Bereich der Materialwissenschaften hat die Forschung mit Photonen am DESY einzigartige Perspektiven.

Charakterisierung von Quadrupolübergängen in der Röntgenabsorption mit resonanter Augerspektroskopie

Die Röntgenabsorption ist nicht nur elementspezifisch, sondern sie erlaubt auch Aussagen über Orbitalsymmetrien, da sie strikten Auswahlregeln unterliegt. Die Struktur der Absorptionsspektren ist in der Regel dominiert durch Anregungen, die in der Dipolnäherung beschrieben werden können. Allerdings werden zum Teil auch ausgeprägte Maxima geringer Intensität nahe der Absorptionskante beobachtet, die auf quadrupolaren Übergängen beruhen. So werden beispielsweise an den L-Kanten von 4f Seltenen-Erdverbindungen sogar Quadrupolübergänge ($2p \rightarrow 4f$) beobachtet, deren Stärke von der gleichen Größenordnung ist wie die der Dipolübergänge ($2p \rightarrow 5d$). Diese Strukturen beinhalten wertvolle Informationen beispielsweise für das Verständnis magnetischer Eigenschaften.

An der K-Absorptionskante von Übergangsmetallverbindungen werden ebenfalls in vielen Fällen Maxima im Vorkantenbereich (Vor-Maxima) beobachtet, die von dipolaren wie auch von quadrupolaren Übergängen herühren. Ein genaues Verständnis dieser Anregungen ist wichtig für eine detaillierte Beschreibung der elektronischen Struktur dieser Materialien, und um den Einfluss von Quadrupoleffekten auf andere Messmethoden zu bestimmen.

In der Röntgenabsorption an kristallinen Proben unterscheidet man üblicherweise die dipolaren von den

quadrupolaren Übergängen durch eine unterschiedliche Winkelabhängigkeit der Absorption, die durch die Übergangsmatrixelemente gegeben ist. Während Dipolübergänge durch den Operator $(\hat{\epsilon} \cdot \mathbf{r})$ beschrieben werden und daher lediglich auf den Polarisationsvektor $\hat{\epsilon}$ der anregenden Strahlung sensitiv sind, besitzen Quadrupolübergänge $(\hat{\epsilon} \cdot \mathbf{r})(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ eine Abhängigkeit sowohl vom Polarisationsvektor $\hat{\epsilon}$ als auch vom Wellenvektor \mathbf{k} . Eine Messung dieser Winkelabhängigkeit setzt allerdings eine einkristalline Struktur sowie die Unterscheidung der in der Regel schwachen Quadrupolübergänge in der Absorptionskantenstruktur von den starken Dipolanteilen voraus. Deshalb werden vor allem Materialien untersucht, die im Vorkantenbereich separierte Absorptionsstrukturen aufweisen. Dennoch ist es in jedem Fall schwierig, gemischt dipolare und quadrupolare Beiträge zu quantifizieren.

Diese Einschränkungen können weitgehend überwunden werden, wenn statt des integralen Absorptionsquerschnitts die Energieabhängigkeit der zugehörigen sekundären Prozesse wie der Augerelektronenemission gemessen wird. Bei dieser resonanten Augerspektroskopie wird die Energieverteilung eines Auger-Endzustands als Funktion der Anregungsenergie im Bereich der Absorptionskante hochaufgelöst gemessen. Wird bei der Absorption das Rumpfelektron in einen unbesetzten lokalisierten Zustand angeregt, so erfolgt der Augerzerfall in Gegenwart des angeregten Elektrons („Spectator“-Übergang). Dieser resonante Prozess führt aufgrund des veränderten lokalen Coulombpotentials zu energetisch unterschiedlichen Augerzerfällen, die im Experiment als zusätzliche separate Linien gemessen werden können. Dieser Resonanzeffekt wird auch in der Fluoreszenz beobachtet, das heißt beim strahlenden Zerfall.

Im Experiment ist eine hohe Energieauflösung erforderlich, um zum einen die lokalisierten Zustände selektiv resonant anzuregen und zum anderen die unterschiedlichen Endzustandsenergien trennen zu können. Die am Röntgenwiggler-Messplatz BW2 betriebene Röntgenphotoemissions-Apparatur ist dazu geeignet, denn auch bei vergleichsweise hohen Energien von einigen keV können Photo- bzw. Augerelektronen hochaufgelöst mit hoher Empfindlichkeit gemessen werden.

Diese besonderen Eigenschaften wurden ausgenutzt, um die in der Literatur viel diskutierte Ti K-Kantenstruktur von Rutil TiO_2 zu untersuchen, insbe-

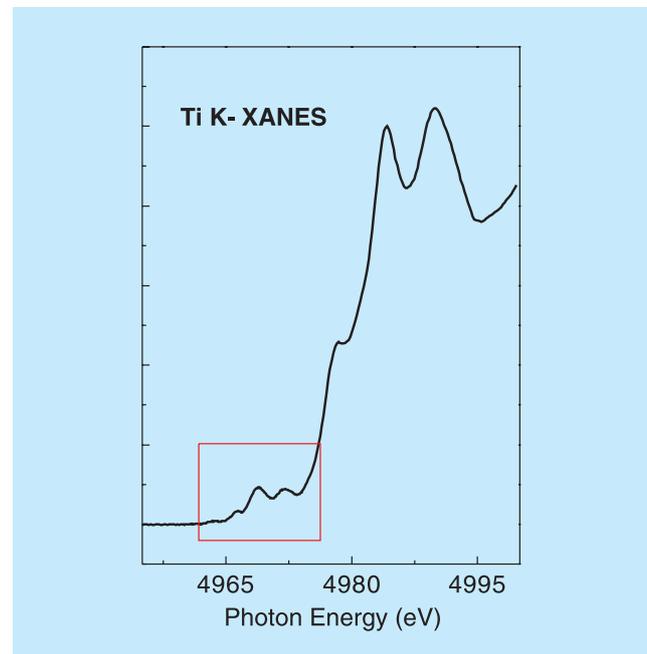


Abbildung 60: *Ti K-Absorptionsfeinstruktur von Rutil $\text{TiO}_2(110)$, die nahe der Kante drei charakteristische kleine Maxima aufweist, deren Ursprung mit resonanter Augerspektroskopie untersucht wurde.*

sondere im Hinblick auf den Dipol- bzw. Quadrupolcharakter der ausgeprägten Vor-Maxima. Um eine hinreichend gute Energieauflösung bei der Anregung zu erhalten, wurde der Röntgenmonochromator mit Si(220) Doppelkristallen betrieben. Die Messung der emittierten Elektronen erfolgte mit einem hemisphärischen Elektronenanalysator, die Gesamtenergieauflösung betrug 0.6 eV an der Ti K-Kante (4970 eV). Die Messungen wurden an einem $\text{TiO}_2(110)$ Einkristall durchgeführt, der im Ultrahochvakuum präpariert wurde, um eine wohlgeordnete und stöchiometrische Oberfläche zu erhalten. Eine Veränderung des Winkels wurde durch eine Rotation der Probe relativ zum einfallenden Strahl erreicht.

Charakteristisch für die Ti K-Absorptionsstruktur in TiO_2 sind drei kleine, aber ausgeprägte Maxima im Vorkantenbereich (Abb. 60), die mit A_1 , A_2 und A_3 bezeichnet werden. Es ist seit längerem bekannt, dass die Intensität dieser Maxima eine charakteristische Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Photonen relativ zur Kristalloberfläche aufweist (Abb. 62 oben). Da an der K-Kante die dipolaren Übergänge in die

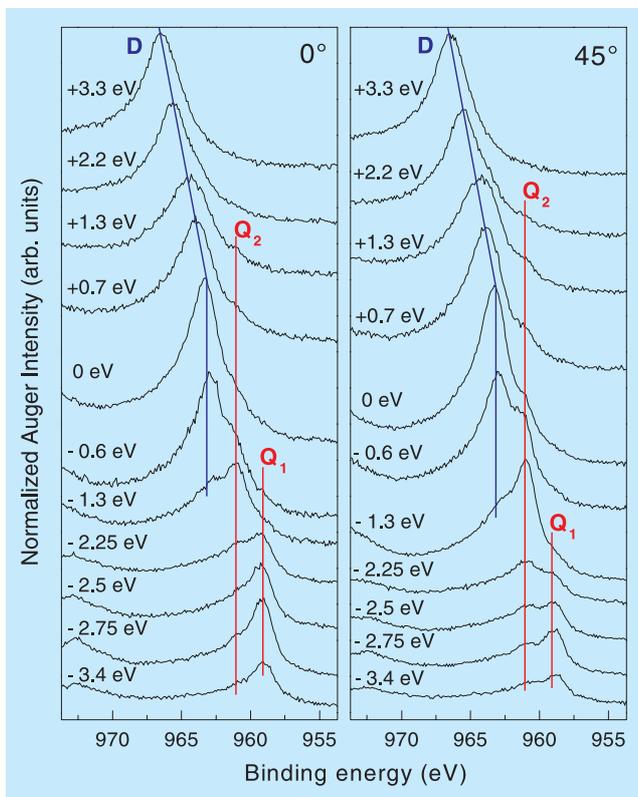


Abbildung 61: *Photonen-Energieabhängigkeit der Ti $KL_2L_3(^1D_2)$ Augerlinie im Bereich der Ti K-Kante von $TiO_2(110)$ für zwei unterschiedliche Winkel der einfallenden Strahlung relativ zur Oberflächennormalen. Die Photonenenergie ist relativ zur Position des mittleren Vor-Maximums angegeben. Die Augerlinie besteht aus drei Komponenten, die jeweils quadrupolaren Übergängen in lokalisierte, unbesetzte Ti 3d-Zustände (Q_1 , Q_2) bzw. dipolaren Übergängen in p-artige Zustände (D) zugeordnet werden können. Da die Elektronenenergie als Bindungsenergie dargestellt ist, verschiebt sich die Lage der „normalen“ Augerlinie D zu größeren Bindungsenergien oberhalb der Schwellenenergie, das heißt ihre kinetische Energie ist dann konstant.*

stark gerichteten p-Orbitale erfolgen, die die Kristallsymmetrie widerspiegeln, wird für diese keine Winkelabhängigkeit erwartet. Im Gegensatz dazu ergibt sich für die quadrupolaren Übergänge in die unbesetzten d-Orbitale gerade die größtmögliche Intensitätsänderung zwischen den beiden Messgeometrien. Die beobachtete Intensitätsmodulation ist demnach auf Quadrupolübergänge in Ti d-Zustände zurückzuführen,

die durch den Einfluss des Kristallfeldes in e_g - bzw. t_{2g} -Zustände aufgespalten werden. Ein Vergleich mit theoretischen Vorhersagen ergibt, dass die Struktur A_1 (Maximum bei 0° , Minimum bei 45°) qualitativ Übergängen in die energetisch abgesenkten t_{2g} -Zustände entspricht und A_2 (umgekehrtes Verhalten) Übergängen in die energetisch höher liegenden e_g -Zustände. A_3 ist winkelunabhängig und demnach Dipolübergängen zuzuordnen. Eine eventuelle Mischung verschiedener Beiträge lässt sich hieraus nicht ableiten.

Diese aus früheren winkelabhängigen Absorptionsmessungen bekannten Resultate konnten hier bestätigt werden. Interessant ist nun das Verhalten der Ti $KL_{2,3}L_{2,3}$ Augeremission im Bereich dieser Vor-Maxima, deren Energieverteilung hochaufgelöst gemessen wurde. Bei einer Photonenenergie weit oberhalb der K-Kante zeigt das Augerspektrum mehrere Linien aufgrund der atomaren Multiplettaufspaltung. Hier soll nur die intensivste Linie, $KL_2L_3(^1D_2)$, betrachtet werden, die eine kinetische Energie von (4006.3 ± 1) eV besitzt. Die Energieverteilung der Elektronen im Bereich dieser Linie als Funktion der Anregungsenergie für die beiden Messgeometrien zeigt Abbildung 61. Die Anregungsenergie ist jeweils relativ zur Position des mittleren Maximums (A_2) angegeben.

Im Bereich der Absorptionskante ist die 1D_2 Augerlinie in drei Komponenten (Q_1 , Q_2 , D) aufgespalten, deren Intensitäten mit der Anregungsenergie und Messgeometrie variieren. Komponente D besitzt zunächst eine konstante Bindungsenergie, die bei etwa $\Delta h\nu = 0$ in die konstante kinetische Energie des normalen Augerzerfalls übergeht (Auger-Raman Prozess). In guter Näherung folgt die Intensität dieser Linie dem Verlauf der Absorption oberhalb der Kante. Dagegen haben Q_1 und Q_2 eine konstante Bindungsenergie und zeigen ein resonanzartiges Verhalten bei unterschiedlichen Anregungsenergien. Durch eine geeignete Anpassung des Spektrums als Summe dreier Linien lassen sich die individuellen Intensitäten separieren (Abb. 62).

Während Q_1 maximale Intensität im Maximum A_1 besitzt, liegt das Intensitätsmaximum von Q_2 zwischen A_1 und A_2 . Linie D zeigt eine Überhöhung an der Position von A_2 und folgt für höhere Photonenenergien dem Verlauf der Absorption. Das Maximum A_2 besitzt demnach sowohl dipolare als auch quadrupolare Beiträge.

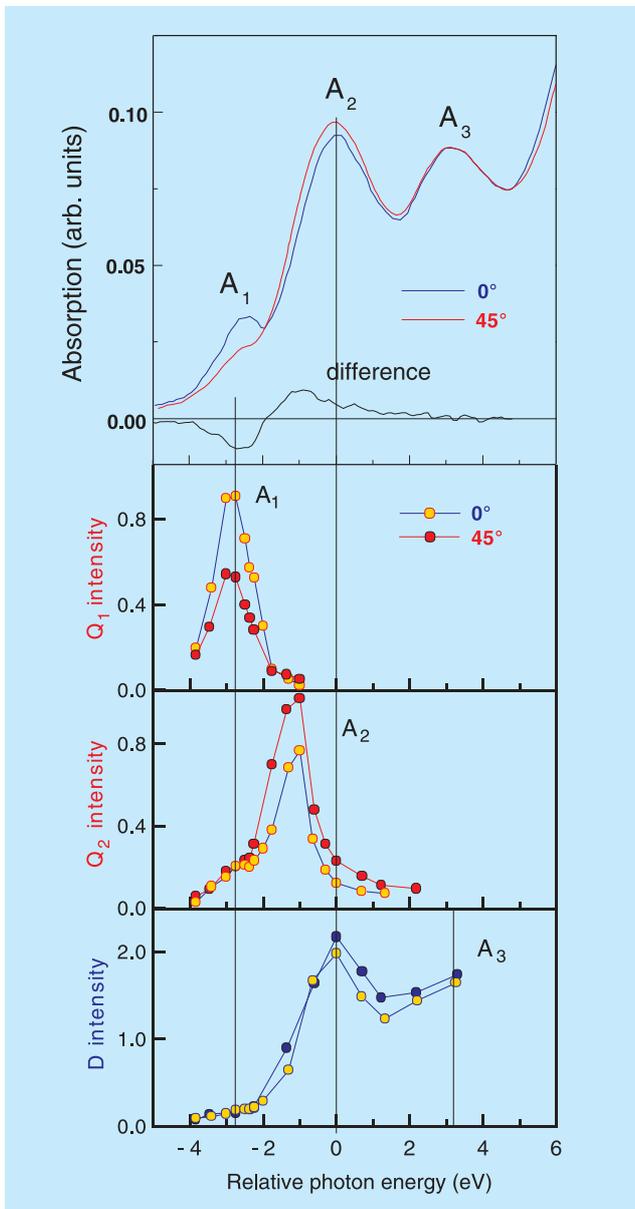


Abbildung 62: Oben: Absorptionsspektren im Bereich der Vor-Maxima für verschiedene Einfallswinkel der Photonen (normiert auf die Absorption oberhalb der Ti K-Kante). Die Maxima A_1 und A_2 zeigen eine gegenläufige Intensitätsvariation mit dem Winkel, die auf quadrupolare Übergänge zurückzuführen ist. Unten: Intensitäten der drei Komponenten der Ti $KL_2L_3(^1D_2)$ Augerlinie (Q_1 , Q_2 , D) aus Abbildung 61 als Funktion der Anregungsenergie relativ zur Position des mittleren Maximums A_2 . Zu beachten ist insbesondere die unterschiedliche Modulation von Q_1 und Q_2 in Abhängigkeit vom Photoneinfallswinkel.

Komponente D wird interpretiert als normaler Augerübergang, der einer dipolaren Anregung ($1s \rightarrow np$) folgt. Dies ergibt sich zum einen aus der Winkelunabhängigkeit des Intensitätsverlaufs, zum anderen aus der Variation der Energieposition (siehe oben). Entsprechend können Q_1 und Q_2 quadrupolaren Übergängen zugeordnet werden. Da ihre Bindungsenergien jeweils konstant sind und geringer als die Bindungsenergie von D, werden sie interpretiert als „Spectator“-Augerübergänge nach Anregung des $1s$ Elektrons in lokalisierte unbesetzte Ti d-Zustände. Diese Energieminderung ist Folge der Abschirmung des $1s$ Rumpfloches durch die kompakten d-artigen Zustände, die effektiver ist als die der p-artigen Zustände. Der quadrupolare Charakter wird ebenfalls deutlich durch die ausgeprägte winkelabhängige Intensitätsvariation (Abb. 62).

Bemerkenswert ist das gegenläufige Verhalten der Intensitäten in den beiden Messgeometrien. Ein Vergleich mit den Quadrupolauswahlregeln ergibt, dass Q_1 einer Anregung in t_{2g} -artige Zustände und Q_2 einer Anregung in e_g -artige Zustände entspricht. Die gemessene Energiedifferenz (2.0 eV) ist in erster Näherung ein Maß für die Kristallfeld-Aufspaltung der d-Zustände. Dies gilt auch für die Energiedifferenz der Resonanzmaxima von Q_1 und Q_2 , die mit 1.75 eV allerdings etwas geringer ist. Berücksichtigen muss man hier das unterschiedliche Abschirmverhalten der Kristallfeld-aufgespaltenen d-Zustände.

Die kombinierte Betrachtung der drei Intensitätsverläufe für Q_1 , Q_2 und D zeigt, dass die Absorptionsstruktur A_1 ausschließlich quadrupolaren und A_3 ausschließlich dipolaren Ursprungs ist, während A_2 durch beide Beiträge beeinflusst wird. Mit der resonanten Augerspektroskopie können die einzelnen Beiträge mit hoher Empfindlichkeit und Selektivität identifiziert und in Grenzen auch quantifiziert werden, was anhand der integralen Absorptionskantenstruktur nicht möglich ist. Dies wird vor allem am Beispiel der Linie Q_2 deutlich, die eine wohldefinierte Quadrupolanregung identifiziert, die jedoch im Absorptionsspektrum nicht als separate Struktur in Erscheinung tritt. Da die Quadrupolanteile in den Augerspektren auch durch eine unterschiedliche Elektronenenergie und Resonanzenergie charakterisiert sind, lassen sich zum Beispiel auch nicht-kristalline Systeme untersuchen, bei denen winkelabhängige Messungen versagen.

Experimente an Atomen und Clustern mit FEL-Strahlung

Wie bereits im letzten Jahresbericht dargestellt, konnten erste erfolgreiche Experimente mit dem Freielektronen Laser durchgeführt werden. Die Entwicklung von intensiven Lasern hat in den letzten Jahren ganz neue Forschungsfelder in der Physik und Chemie erschlossen und große Bereiche der optischen Technologie revolutioniert. Der VUV FEL ermöglicht es, erstmals Experimente mit hochintensiver Strahlung bei kurzen Wellenlängen im VUV-Spektralbereich durchzuführen. Bisher waren leistungsstarke Laser auf den optischen und angrenzenden ultravioletten Spektralbereich begrenzt. Der VUV FEL erlaubt damit die Untersuchung optisch nicht-linearer Prozesse wie beispielsweise die Multiphoton-Ionisation. Solche Untersuchungen haben das Ziel, die Wechselwirkung extrem intensiver VUV-Pulse mit Materie zu studieren. Erste Experimente wurden an Edelgasatomen und -clustern durchgeführt. Im Frühjahr 2002 konnte neben der Flugzeitmassenspektroskopie zum Nachweis der Ionisationsprodukte auch die Photoelektronenspektroskopie zur Analyse der Wechselwirkung der FEL-Strahlung mit Atomen und Clustern eingesetzt werden. Die Photoemission erlaubt es, direkte Information über den Ionisationsprozess zu gewinnen.

Die Experimente wurden in einer Molekularstrahlapparatur im Tunnel des TTF-Beschleunigers (Phase I) durchgeführt. Ein gepulster Strahl von Edelgasclustern wird durch die Expansion eines Gases bei hohem Druck durch eine kleine Düse hergestellt. Die Größe der Cluster kann durch den Druck an der Düse kontrolliert werden. Die FEL-Strahlung mit einer Wellenlänge von 98 nm (Bandpass 0.5 nm) wird mit einem elliptischen Spiegel auf den Clusterstrahl fokussiert. In dem Fokus beträgt die Leistungsdichte bei einer Pulsdauer von etwa 100 fs bis zu 10^{14} W/cm². Sie kann um zwei Größenordnungen reduziert werden, indem der Clusterstrahl aus dem Fokus bewegt wird. Die dabei erzeugten Ionen und Elektronen wurden mit Flugzeitspektrometern nachgewiesen. Massen- und Photoelektronenspektren wurden Puls für Puls aufgenommen und anschließend abhängig von der Intensität der FEL-Strahlung sortiert.

Cluster zerfallen bei der Bestrahlung von einigen 10^{13} Watt/cm² vollständig in einfach oder mehrfach gela-

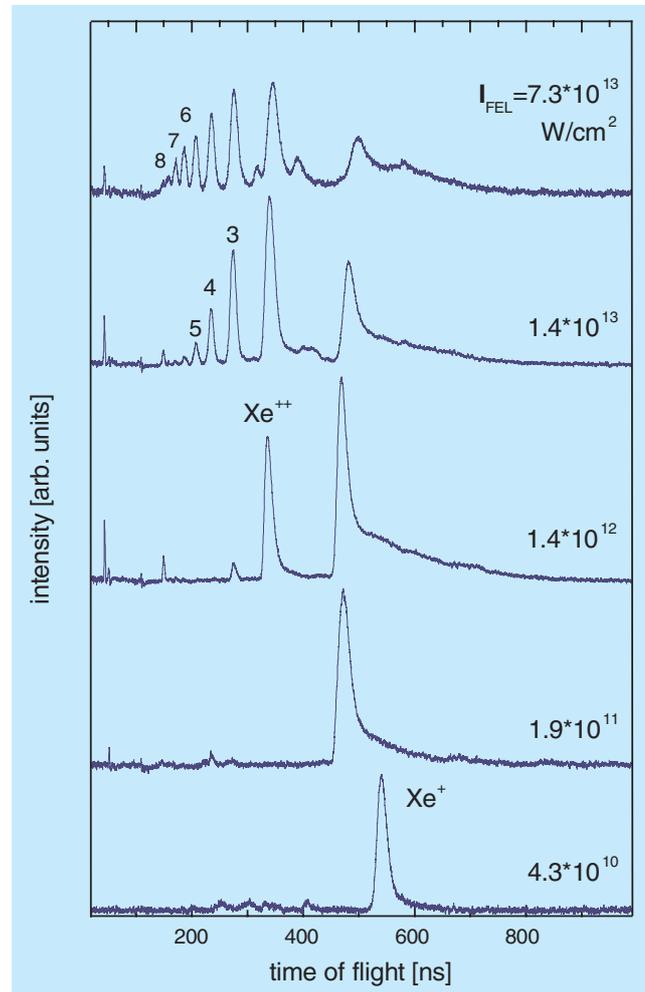


Abbildung 63: Flugzeitmassenspektren, die nach der Ionisation von Xenonclustern aus 1500 Atomen (Mittelwerte der Größenverteilung) bei verschiedenen Intensitäten aufgenommen wurden. Die einzelnen Linien können atomaren Xenon-Ionen mit kinetischen Energien von einigen hundert eV zugeordnet werden. Die jeweiligen Leistungsdichten I_{FEL} sind in der Abbildung angegeben.

dene atomare Bruchstücke (Abb. 63). Die Linien im Massenspektrum in Abbildung 63 sind stark verbreitert und zum Teil aufgespalten. Dies lässt sich mit der hohen kinetischen Energie der Ionen erklären. Aus der Verbreiterung der Linien und der Aufspaltung kann die Energie der Ionen bestimmt werden. Sie nimmt mit dem Ladungszustand zu und beträgt bis zu 2.5 keV bei Xe^{7+} . Bei der Ionisation werden einzelne atomare

Ionen erzeugt, die sich aufgrund der repulsiven Wechselwirkung abstoßen (Coulomb-Explosion). Die Ionisationsprozesse hängen stark von der Leistungsdichte der Strahlung ab. Bei reduzierter Leistungsdichte nimmt die Intensität von hochgeladenen Ionen ab. Dies zeigt, dass erst bei den hohen Leistungsdichten optisch nicht-lineare Prozesse in den Clustern induziert werden. Bei Xenonclustern aus 2000 Atomen werden mit dem FEL bis zu 400 eV pro Atom deponiert, dies entspricht der Absorption von etwa 30 Photonen pro Atom. Selbst bei einer verringerten Leistungsdichte von 10^{11} W/cm² wird noch die Coulomb-Explosion der Cluster beobachtet. Bei Infrarot-Lasern wird zum Vergleich eine mehr als 100mal höhere Leistungsdichte zur Explosion der Cluster benötigt.

Um die Absorption und den Ionisationsmechanismus zu verstehen, wurden Simulationsrechnungen für kleine Cluster durchgeführt. Die Bewegung der Elektronen im Feld der anderen Elektronen, der positiven Ionenrümpfe und des elektrischen Feldes der FEL-Strahlung wurde numerisch in Schritten von Bruchteilen von fs berechnet. Abbildung 64 zeigt die Trajektorien von Elektronen in Xe₁₃ Clustern, die mit 100 fs langen Pulsen bestrahlt wurden. Die Elektronen bewegen sich auf komplizierten Bahnen durch den Cluster, bevor sie genug Energie aus dem Strahlungsfeld aufgenommen haben, um den Cluster zu verlassen. Die Elektronen werden bei der Beleuchtung mit VUV-Strahlung (98 nm Wellenlänge) isotrop emittiert. Dies ist ein starkes Indiz dafür, dass es sich um eine thermische Elektronenemission handelt. Analoge Rechnungen für infrarotes Licht (800 nm Wellenlänge) zeigen eine klare Vorzugsrichtung der Elektronenemission in Richtung der Polarisationsrichtung des FELs. Bei infraroter Strahlung werden die meisten Elektronen bereits während des ersten optischen Zyklus des Lasers feldionisiert.

Die Simulationen belegen, dass der Ionisationsmechanismus bei kurzen Wellenlängen deutlich anders ist. Bei den hohen Frequenzen im VUV wechselt das elektrische Feld so schnell die Richtung, dass die Elektronen keine Zeit haben, während einer optischen Periode aus dem Coulomb-Feld der Ionenrümpfe zu entkommen. Mit Hilfe der klassischen Rechnungen konnte darüber hinaus die Absorption der Cluster bestimmt werden. Die experimentell ermittelten Werte von einigen hundert eV pro Atom liegen deutlich oberhalb der berechneten Werte von 25–85 eV pro Atom.

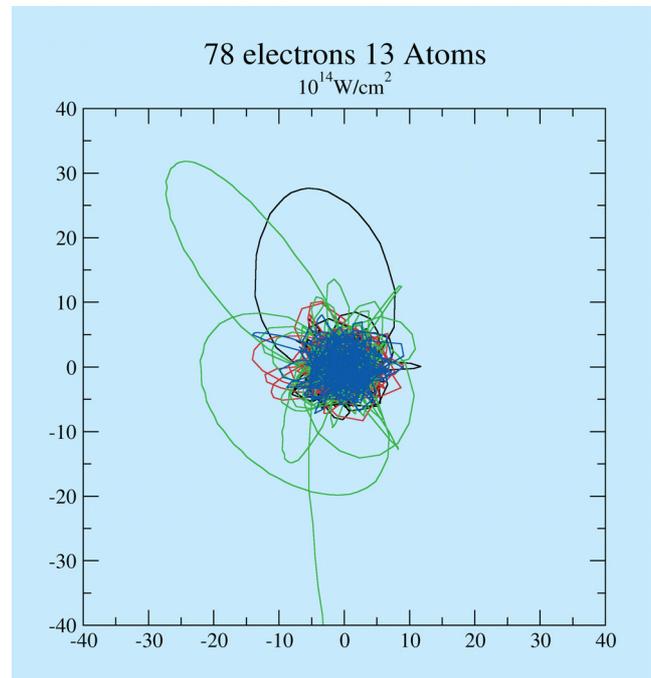


Abbildung 64: *Klassische Simulation von Elektronen-Trajektorien für einen Xe₁₃ Cluster, der von einem 100 fs langen VUV-Puls mit 10^{14} W/cm² Leistungsdichte bestrahlt wurde. Die Position der positiven Ionen wurde während der Simulation konstant gehalten. Die Skala ist in Å. Verschiedene Farben entsprechen verschiedenen Elektronen.*

Eine quantenmechanische Beschreibung der Absorption dürfte bei diesen hohen Photonenenergien weiteren Aufschluss über den Absorptionsmechanismus geben. Die Interpretation einer thermischen Elektronenemission wird durch die gemessenen Photoelektronenspektren bestätigt, die einen nahezu exponentiellen Abfall der kinetischen Elektronenenergien zu hohen Werten zeigen. Die im optischen Spektralbereich dominante Feldionisation durch das elektrische Wechselfeld des Lasers ist im VUV ohne Bedeutung.

Die Untersuchungen belegen, dass auch bei kurzen Wellenlängen optisch nichtlineare Prozesse eine wichtige Rolle spielen. Weiterführende Experimente fanden kurz vor Ende der Phase I im Frühjahr 2002 statt. Sie zeigen, dass sich mit dem VUV FEL auch Multiphoton-Prozesse in Atomen und Molekülen induzieren lassen. Der VUV FEL eröffnet damit ein weites Feld für zukünftige Untersuchungen.

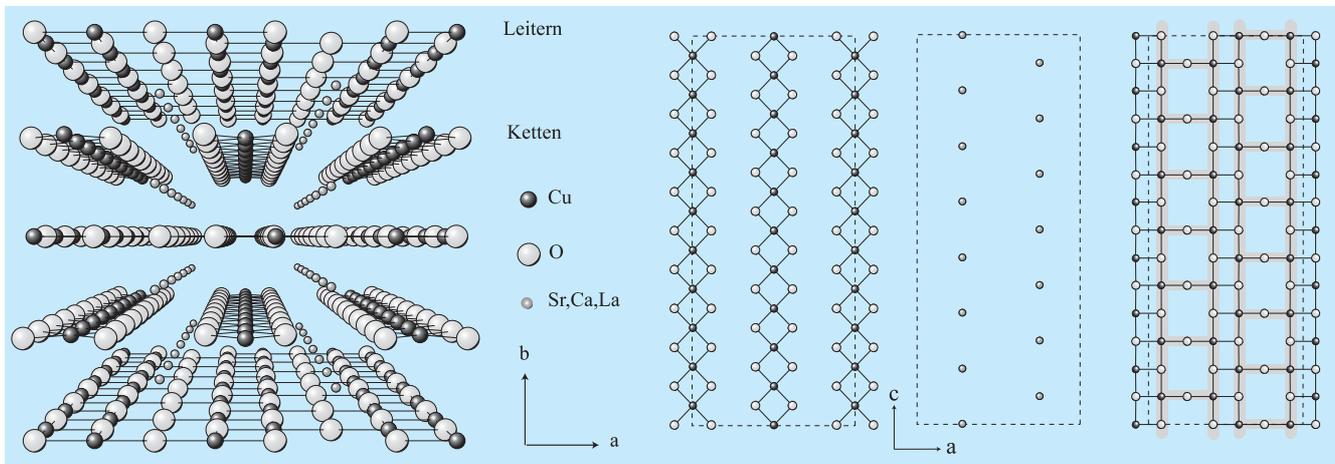


Abbildung 65: Links: Räumliche Darstellung der Struktur von $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$. Rechts: Aufsicht auf die Struktur der Ketten (links) und der Leitern (rechts). Beide sind durch eine Sr-Schicht miteinander verbunden (Mitte).

Strukturelle Modulationen in $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ und deren Beziehung zur Ladungsordnung

Materialien aus Spin-Leitern und Spin-Ketten stoßen derzeit auf großes Interesse in der Festkörperphysik, da deren strukturelle Grundbausteine, Einheiten aus CuO_2 , denen der Hochtemperatur-Supraleiter sehr ähnlich sind. Während die Hochtemperatur-Supraleiter aus einem zweidimensionalen Netzwerk von CuO_2 -Einheiten aufgebaut sind, bilden diese in Spin-Ketten eine eindimensionale Struktur. Zwei Spin-Ketten bilden eine Spin-Leiter, deren Struktur zwischen der eindimensionalen Kette und den zweidimensionalen Netzwerken einer Ebene liegt. Der Magnetismus spielt hier eine besondere Rolle, wie der Name bereits andeutet. An diesen Systemen lässt sich deshalb besonders das Wechselspiel von Spinfreiheitsgraden mit Ladungsfreiheitsgraden und deren Anregungen experimentell studieren und direkt mit Ergebnissen aus Modellrechnungen vergleichen. Vermutlich tragen solche Anregungen auch zum Mechanismus der Supraleitung bei.

$Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ ist ein Material, in dem sowohl Ketten als auch Leitern in geschichteter Abfolge entlang der kristallographischen b-Achse auftreten, wobei die ausgezeichnete Richtung der Ketten und Leitern senkrecht

dazu steht (Abb. 65). Dieses System ist insbesondere interessant, da unter Druck und teilweiser Ersetzung von Sr-Atomen durch Ca-Atome ein supraleitender Zustand mit einer Sprungtemperatur von 12 K beobachtet wurde. In dieser Arbeit sind die strukturellen Veränderungen des Materials, die auf das Auftreten von Ladungsordnung hindeuten, untersucht worden. Man kann davon ausgehen, dass die Ladungsträger bei tiefer Temperatur lokalisiert sind, da die Valenz von Cu im Mittel 2.25 beträgt und bei tiefen Temperaturen ein isolierender Zustand beobachtet wird. Messungen der Röntgenabsorption und der optischen Leitfähigkeit weisen darauf hin, dass sich von den sechs überschüssigen Löchern pro Formeleinheit fünf in den Ketten befinden und eins in den Leitern lokalisiert ist. Ferner wurde bei NMR-Experimenten bei Temperaturen unterhalb 200 K eine Aufspaltung der Resonanzlinie der Ketten beobachtet, welche auf die Koexistenz von zwei verschiedenen Kupfer-Plätzen hindeutet. Auf dem einen Platz befindet sich dann ein Kupfer mit Spin 1/2 im Valenzzustand 2+, auf dem anderen Platz bildet das Kupfer-Ion zusammen mit einem zusätzlichen Loch einen nicht-magnetischen Zustand, ein so genanntes Zhang-Rice Singulett. Oberhalb von 200 K verschwindet diese Linienaufspaltung und es wird vermutet, dass thermische Fluktuationen für den ungeordneten Zustand verantwortlich sind. Auch Raman-Messungen sprechen für eine Lokalisation von La-

dungsträgern und eine Aufhebung der Translationsinvarianz der Ketten.

Erstaunlicherweise ist bisher nur durch Untersuchungen mit lokalen Sonden auf einen ladungsgeordneten Zustand geschlossen worden. Ladungsordnung lässt sich auch mit Hilfe von Röntgenbeugung durch das Auftreten von Satellitenreflexen nachweisen. Diese Reflexe deuten auf strukturelle Verzerrungen hin, welche durch die Coulomb-Wechselwirkung der Ladungsträger mit der Umgebung verursacht werden. Dabei zeigt die Position der Satellitenreflexe, die man auch Überstrukturreflexe nennt, die Periode der Verzerrung an, während die Intensität dieser Reflexe ein Maß für die Stärke der Verzerrung ist. Im Gegensatz zur NMR-Spektroskopie lässt sich mit Röntgenbeugung auch die Anordnung der Ladungsträger im Kristallgitter untersuchen und damit Information über deren Wechselwirkungen gewinnen.

Ein $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ Einkristall wurde mit hochenergetischer (100 keV) Röntgenbeugung charakterisiert. Das Experiment wurde an der Hochenergiebeamline BW5 am HASYLAB durchgeführt. Der Photonenfluss wurde mit Hilfe von SiGe-Gradientenkristallen als Monochromator und Analysator optimiert. Die Verwendung der harten Röntgenstrahlung mit Eindringtiefen von einigen Millimetern in die Probe gewährleistet, dass Volumeneigenschaften studiert werden, und Verunreinigungen an der Probenoberfläche keinen Einfluss haben.

Abbildung 66 zeigt eine Messung entlang (0,0,l) bei 10 K und 270 K, wobei die Indizierung hier und im Folgenden in Einheiten der Ketten vorgenommen wird. Neben dem Braggreflex der Ketten bei $l = 2$, mit etwa 10^7 counts/sec im Maximum (in Abb. 66 nicht gezeigt), findet man bei 270 K eine Reihe von Überstrukturreflexen, wie zum Beispiel bei $l = 2.19$. Im Gegensatz zu der bisherigen Annahme, dass nur die Ketten durch Ladungsordnung verzerrt sind, zeigt sich, dass diese Überstrukturreflexe von Verzerrungen sowohl in den Leitern als auch in den Ketten stammen. Außerdem lassen sich auch Überstrukturreflexe bis zu sehr hohen Ordnungen beobachten (in Abb. 66 mit Ziffern gekennzeichnet). Die Periode dieser Verzerrung ergibt sich aus der Differenz der Gitterkonstanten der Ketten und der Leitern und beträgt 3.32 Einheitszellen der Ketten. Bei dieser Verzerrung handelt es sich um eine annä-

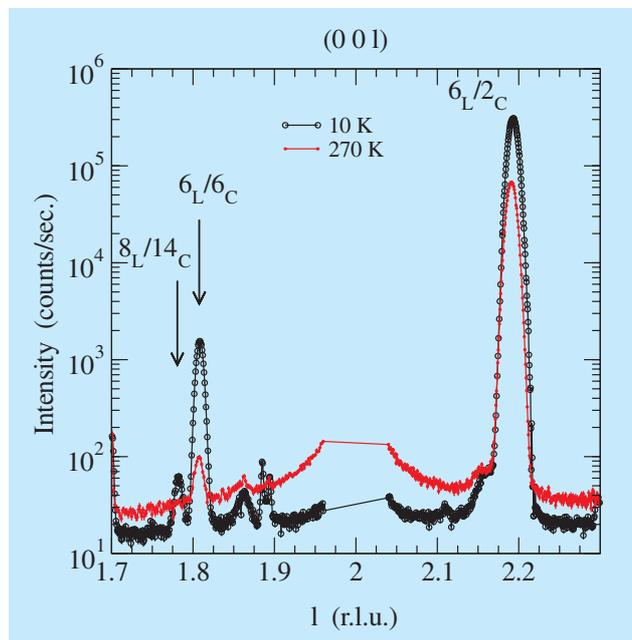


Abbildung 66: Messungen entlang (0,0,l) bei 10 K und 270 K. Der Index l bezeichnet Ketteneinheiten, der Braggreflex der Kettenstruktur liegt bei (0,0,2) und wurde in diesen Scans ausgelassen. Die Nummern zeigen die Ordnung der Überstrukturreflexe der Ketten (C) bzw. Leitern (L).

hernd sinusförmige Auslenkung der Atome entlang der c-Achse.

Bei 10 K wird ein deutlicher Anstieg der Intensität der Überstrukturreflexe höherer Ordnungen beobachtet, während sich deren Position nicht ändert. Das Anwachsen der Reflexe hoher Ordnung lässt sich auf eine Änderung der Form der Modulation zurückführen, die nun erheblich von der Sinusform abweicht. Diese geänderte Modulation bei 10 K wird auf das Auftreten einer Ladungsalternanzordnung zurückgeführt. Auch zeigen die Messungen, dass die Ladungsträger Gitterplätze bevorzugen, auf denen der Energieaufwand für eine Gitterverzerrung minimal ist. Die Ladungsordnung passt sich also der strukturellen Modulation an. Abbildung 67 zeigt die Temperaturabhängigkeit zweier Überstrukturreflexe sechster Ordnung. Eine Zunahme der Intensität deutet sich bei etwa 200 K an. Diese Temperaturabhängigkeit stimmt gut mit der in NMR-Experimenten beobachteten Aufspaltung im Spektrum überein.

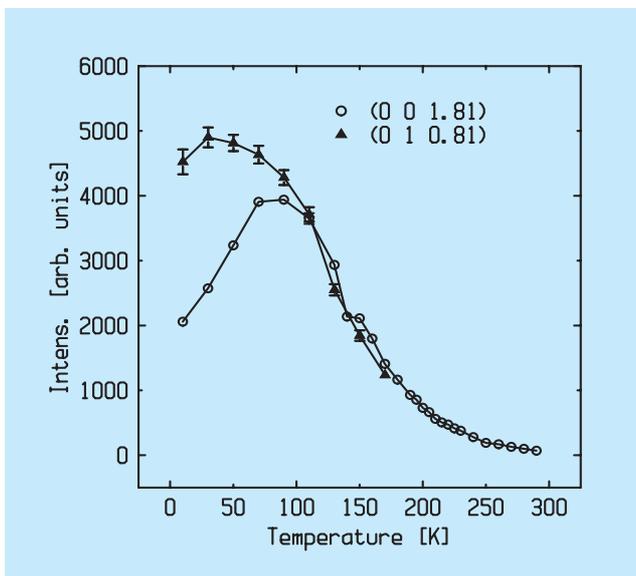


Abbildung 67: Temperaturabhängigkeit zweier Überstrukturreflexe sechster Ordnung.

Es wurden auch Korrelationen zwischen den Leitern und Ketten anhand der Streuprofile der Bragg-Reflexe untersucht. Abbildung 68 zeigt eine Messung des (0,0,2) Ketten-Bragg-Reflexes senkrecht zur Kettenrichtung wiederum bei Temperaturen von 270 K und 10 K. Bei 270 K wird ein sehr breites Streuprofil beobachtet, bei dem die Intensität nur wenig entlang k variiert. Im Gegensatz dazu ist das Reflexprofil entlang der Kettenrichtung l immer scharf. Ein scharfes Reflexprofil deutet auf eine wohlgeordnete Periodizität im Gitter hin, während ein breiter Peak ein Hinweis für eine ungeordnete Struktur darstellt. Daher ergeben die obigen Beobachtungen, dass benachbarte Ketten nur sehr schwach untereinander korreliert sind, aber eine wohldefinierte Periode in Kettenrichtung besitzen. Solch eine Unordnung zwischen den Ketten lässt sich zum Beispiel auf dynamische Fluktuationen zurückführen. Die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit zeigt, dass es sich dabei um Gitterschwingungen handelt. Bei 10 K sieht das Streubild deutlich anders aus. Die Intensität in den Ausläufern des Reflexes nimmt deutlich ab, während die Peak-Intensität bei $k = 0$ um zwei Größenordnungen anwächst. Eine genauere Analyse des Streuprofiles zeigt, dass sich dieses nur mit zwei Komponenten beschreiben lässt: einer scharfen Komponente, welche vom geordneten Gitter der Ketten stammt, und einer breiten Kompo-

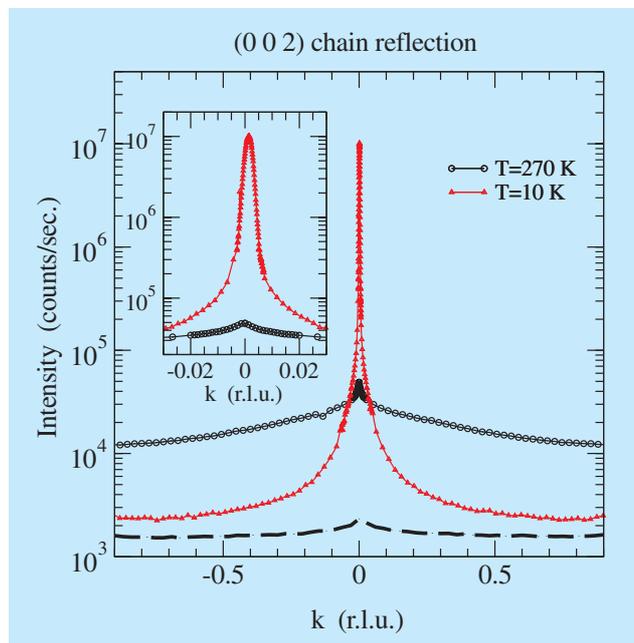


Abbildung 68: Reflexionsprofil des (0,0,2) Kettenreflexes entlang der k -Richtung bei 10 K und 270 K. Bei hoher Temperatur deutet die breite Streuverteilung auf Unordnung zwischen den Ketten hin. Bei 10 K verringert sich der ungeordnete Anteil. Die gebrochene Linie zeigt den Untergrund. Der zentrale Bereich der Messung ist im Einsatz vergrößert dargestellt.

nente, die auf Gitterschwingungen zurückzuführen ist. Während bei hoher Temperatur einzelne Ketten voneinander entkoppelt vorliegen und eine eindimensionale Struktur bilden, gehen bei tiefer Temperatur die Ketten zum Teil in ein dreidimensional geordnetes Gitter über. Das Gitter der Leitern zeigt im Gegensatz zum Kettengitter keinen großen Unterschied in der Streuverteilung bei 270 K und 10 K. Jedoch besteht auch hier das Reflexprofil aus zwei Komponenten. Die breite Komponente in der Leiterstruktur lässt sich vermutlich auf eine Kopplung zwischen den Ketten und Leitern zurückführen.

Da sich sowohl die Intensität der Überstrukturreflexe hoher Ordnung als auch die Intensität der thermisch diffusen Streuung bei etwa 200 K stark ändern, liegt die Vermutung nahe, dass beide Effekte zusammenhängen. Eine Lokalisation von Ladungsträgern in den Ketten würde in der Tat die Kopplung zwischen den Ketten aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung ver-

stärken und dadurch die Dynamik der Gitterschwingungen dämpfen. Diese Hypothese deckt sich mit den Beobachtungen mit NMR Spektroskopie.

Bei der Untersuchung der Gitterverzerrungen in $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ wurde gezeigt, dass in der Nähe von Raumtemperatur sowohl das Leiter-Gitter als auch das Ketten-Gitter aufgrund der unterschiedlichen Gitterparameter der Ketten und Leitern verzerrt sind. Bei tiefen Tempe-

raturen unterhalb 200 K tritt eine zusätzliche Verzerrung auf, die mit einer Ladungsordnung identifiziert wird. Die Ladungsträger passen sich hier in die vorhandene Modulation ein und verzerren diese damit noch weiter. Aufgrund dieser Ladungsordnung wird die dynamische Mode in den Ketten gedämpft und die Kopplung zwischen den Ketten erheblich verstärkt. Es wäre sehr interessant, das thermische Anregungsspektrum der Ketten direkt zu untersuchen.

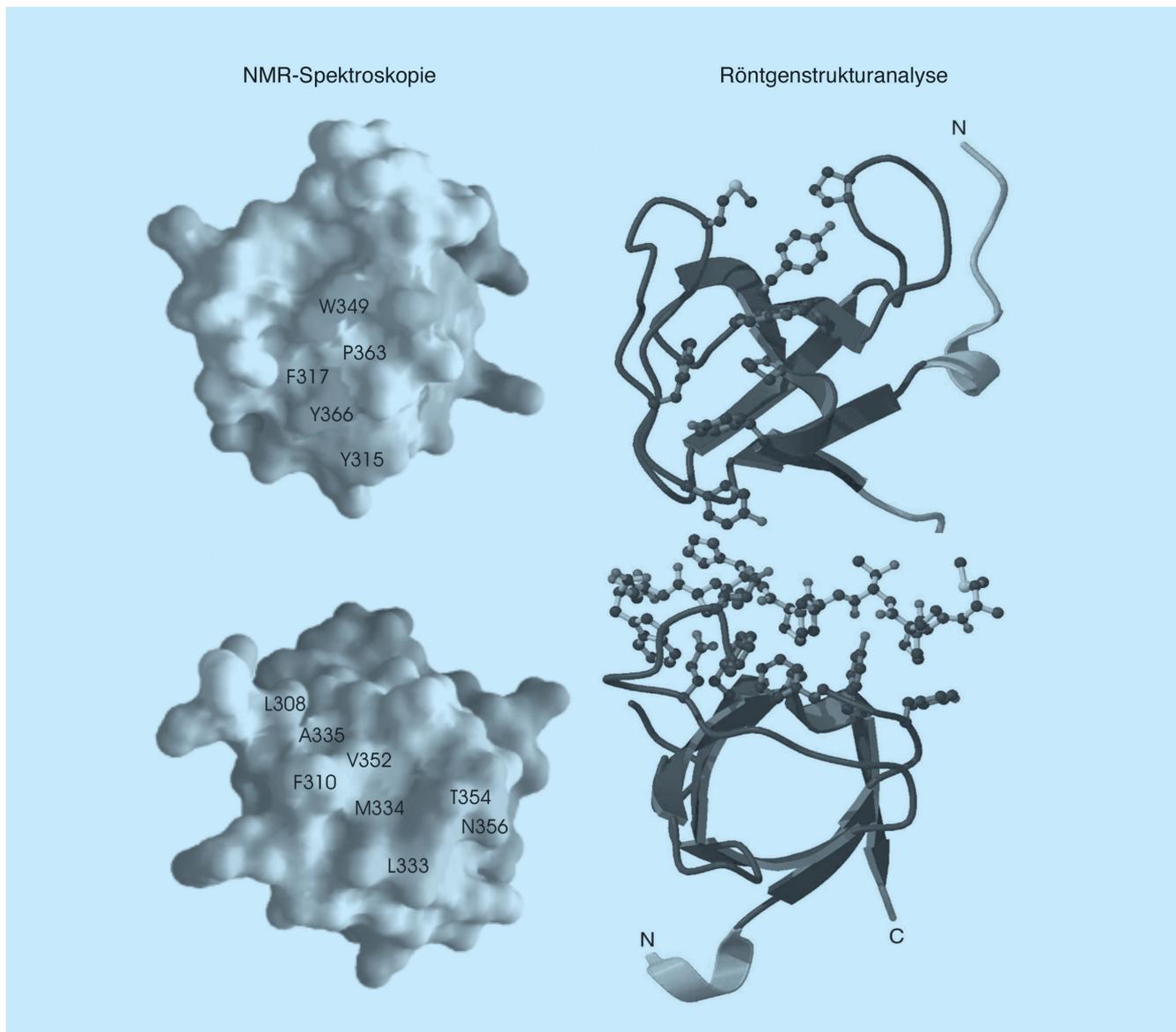


Abbildung 69: Ligandkomplex-Strukturen der Pex13p-SH3 Domäne mit Hilfe von NMR-Spektroskopie (links) und Röntgenstrukturanalyse (rechts). Links: Oberflächendarstellung der Pex13p-SH3-Domäne mit den Bindungsstellen für Pex5p (oben) und Pex14p (unten). Rechts: Ribbondarstellungen der apo-Pex13p-SH3-Domäne (oben) und der Komplexstruktur in Gegenwart eines Pex14p-Peptides in Polyprolin-TypII Konformation (unten).

Europäisches Laboratorium für Molekularbiologie EMBL –Außenstation Hamburg–

Leitung: M. Wilmanns, V. Lamzin

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

Äußerlich stand das Jahr 2002 im Zeichen des Umbaus und der Erweiterung des EMBL-Gebäudes (25A). Es ist nun weitgehend fertig gestellt und macht auch nach außen die Präsenz des EMBL auf dem Gelände von DESY mit dem bekannten grünen Hexagon deutlich. Die Einweihung fand im Rahmen der Wintersitzung des Rates von EMBL im November 2002 in Hamburg statt.

Wichtigstes und größtes Projekt bei EMBL ist nach wie vor der Umbau und Ausbau von Fächer K am DORIS-Ring. Die beiden abgewinkelten Messstationen X11 und X13 mit fixierter Wellenlänge erfreuen sich inzwischen einer sehr guten Reputation.

Die MAD-Messstation X12 mit veränderbaren Wellenlängen soll noch im Jahr 2003 in den Probebetrieb gehen. Seit Oktober 2002 ist EMBL offiziell ein so genannter Node-Partner des ersten Europäischen Strukturproteomik-Projektes SPINE.

Von großer Bedeutung für EMBL sind die DESY-Pläne, den Speicherring PETRA in eine dedizierte Synchrotronstrahlungsquelle umzuwandeln. Ein Workshop im September 2002 machte deutlich, wie groß das Potential für biologische Anwendungen an zukünftigen Messstationen am Speicherring PETRA sein wird.

Wir danken DESY und HASYLAB für die Bereitstellung der Infrastruktur und Synchrotronstrahlung im Jahre 2002.

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

Instrumentierung der Synchrotron-Messstationen

Die Arbeiten an den Strahlführungen X11 und X13, die im Vorjahr begonnen wurden, konnten in diesem Jahr erfolgreich abgeschlossen werden. Durch die Verbesserung der optischen Komponenten und einen optimierten mechanischen Aufbau erhöhte sich die am Probenort verfügbare Intensität um einen Faktor 3. Damit stehen zwei Strahlführungen für die Proteinkristallographie zur Verfügung, die Messungen mit hoher Intensität bei konstanter Wellenlänge (ungefähr 0.85 Å) an nicht zu kleinen Kristallen erlauben. Die Verbesserungen wurden von der Nutzerschaft durchweg sehr positiv bewertet.

Die Hauptaktivität im Verlauf des Jahres war der Aufbau der Vakuumkomponenten sowie der verschiedenen optischen Systeme wie Blenden, Monochromatoren und Röntgenspiegel der Strahlführung X12. Da diese Strahlführung hauptsächlich zur Messung anomaler Streueffekte (MAD) in der Proteinkristallographie verwendet werden wird, musste sie mit einem Monochromatorsystem ausgestattet werden, das eine schnelle, problemlose Änderung der Wellenlänge ermöglicht. Dies wurde mit einem Doppelmonochromator erreicht, dessen zwei Kristalle wie folgt auf einen hochpräzisen Rotationstisch montiert sind: der erste Kristall ist wassergekühlt und kann sowohl vertikal als auch horizontal bezüglich des stationären zweiten Kristalls bewegt werden. Dadurch ist gewährleistet, dass bei einer Wellenlängenänderung die Position des Strahls unverändert bleibt. Abbildung 70 zeigt den Einbau des mechanischen Systems in die entsprechende Vakuumkammer. Einzelheiten sind im HASYLAB Jahresbericht nachzulesen.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automation (IPA) in Stuttgart wurde ein automatischer Probenwechsler für die Proteinkristallographie entwickelt und an der Strahlfüh-

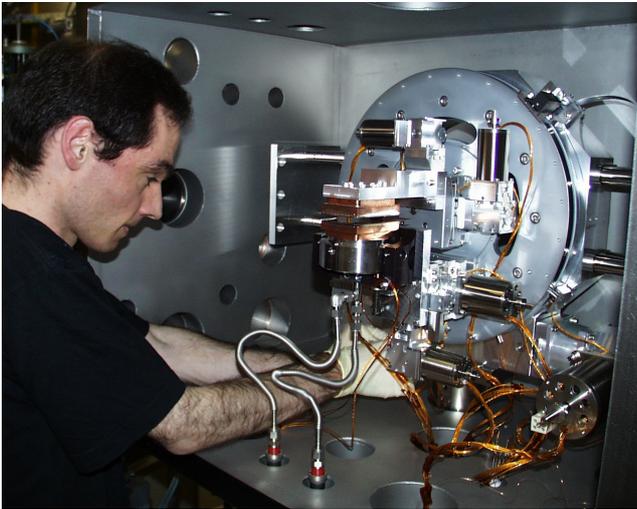


Abbildung 70: Das Doppelmonochromatorsystem wird in den Vakuumbehälter eingebaut.

rung BW7B aufgebaut. Das Problem hierbei bestand darin, den Transfer der Proben aus ihrem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Lagerbehälter zum Goniometerkopf schnell und sicher zu gewährleisten und sie anschließend automatisch im Synchrotronstrahl zu zen-

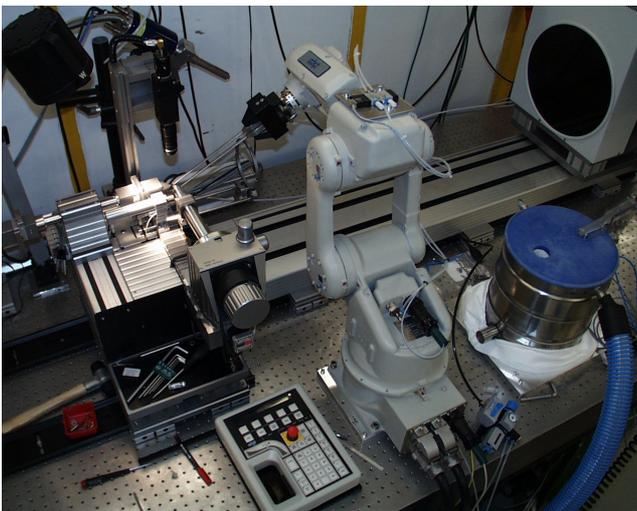


Abbildung 71: Der automatische Probenwechsler an BW7B. Zu sehen sind der Roboter, der Proben-Dewar mit angeschlossenen Nachfüllschlauch sowie der modifizierte kristallographische Messaufbau. Der zweidimensionale Detektor ist am oberen rechten Bildrand sichtbar.

trieren. Der erste Teil der Aufgabe wird von einem 6-Achsen Industrieroboter übernommen, während die automatische Zentrierung mittels eines bei EMBL entwickelten Systems erfolgt. Hierbei werden die erforderlichen Bewegungen durch eine Kombination von hochpräzisen Translationen und magnetischer Kopplung der Komponenten erreicht. Das System wurde im Sommer 2002 erstmals an der Strahlführung aufgebaut, und das Prinzip konnte erfolgreich getestet werden, wengleich Mängel am Proben-Dewar sowie eine erst teilweise vorhandene leicht bedienbare Software noch keinen Nutzerbetrieb zuließen. Eine zweite Testphase mit modifizierten Komponenten und benutzerfreundlicher Software ist für 2003 vorgesehen. Abbildung 71 zeigt den automatischen Probenwechsler beim Testaufbau an BW7B. Auch hierzu finden sich Einzelheiten im HASYLAB Jahresbericht.

Kleinwinkelstreuung an nicht-kristallinen Systemen

Im Laufe des Jahres wurde eine Reihe von Projekten abgeschlossen, um eine Neuordnung der Aktivitäten und Neuverteilung der Verantwortlichkeiten im Rahmen der zukünftigen Forschungsrichtungen an der Außenstelle zu erleichtern. In Zukunft wird sich die Gruppe auf eine kleine Zahl von Projekten und Kollaborationen beschränken. Wie in der Vergangenheit wurde in diesem Jahr viel Zeit investiert, um sicherzustellen, dass die Nutzergruppen ihre Messungen unter bestmöglichen Bedingungen durchführen konnten. Eine Reihe von Änderungen wurde an der Kamera vorgenommen, um Routinemessungen an Proteinlösungen zu vereinfachen. Eine neue, von F. Golding (Lancaster) produzierte Windows-Version des Datenerfassungsprogramms wurde installiert. Diese Entwicklung dient auch anderen externen Gruppen, inklusive HASYLAB, die dieses System für Kleinwinkelstreuungsmessungen verwenden. Weiter wurde ein Multiplexermodul (MX1001 von Smart Silicon Systems, Lausanne) installiert, um die Daten von zwei unabhängigen Detektoren alternierend aufzunehmen. Für statische Messungen bietet diese Lösung eine höhere Auflösung.

Der Prototyp eines Zeit-Digital Umwandlers (TDC) auf der Grundlage eines Moduls, das von der Gruppe

von K. Koningsmann aus Freiburg für das COMPASS-Experiment beim CERN entwickelt wurde, wurde im Rahmen einer Doktorarbeit benutzt, um den Effekt der Bunchstruktur im Speicherring und von simultanen Ereignissen auf Gasdetektoren zu untersuchen. Dieser Ansatz zur Zeit-Digital Umwandlung bietet die Möglichkeit, sekundäre Ereignisse, die nur zum Untergrund beitragen, zu eliminieren. Weiter wurde ein Ausleseprogramm für das bei der ESRF entwickelte N110 TDC erstellt.

Die Hauptthemen bei den Anwendungen der Synchrotronstrahlung, die in Zusammenarbeit mit Nutzergruppen durchgeführt wurden, waren neben den Messungen an Proteinlösungen (siehe unten) auch Studien an kolloidalen Lipidnanopartikelsuspensionen, die neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Medikamententrägern bieten. Weiterhin wurde auch der Strukturpolymorphismus bei Lipopolysacchariden oder Endotoxinen von Gram-negativen Bakterien und die Kopplung zwischen Phasenübergängen sowie die Kristallisation von synthetischen Polymeren untersucht. Details dieser Projekte sind in den Beiträgen der Nutzergruppen im HASYLAB Jahresbericht beschrieben.

Automatische Interpretation von Kleinwinkelbeugungsdaten

Das Programmpaket ATSAS wurde entwickelt und an der Messstation X33 installiert. Es steht ebenfalls über das Internet (<http://www.embl-hamburg.de/ExternalInfo/Research/Sax/>) zur Verfügung. Es enthält Programme zur Datenverarbeitung und das Programmsystem PRIMUS für Datenmanipulationen (Detektorrekorrektur, Normalisierung, Mittelung, Hintergrundsubtraktion usw.). Die Datenanalyse-Programme SASPLOT (für graphische Darstellung), GNOM (für Berechnung charakteristischer Funktionen) und PEAK (für die Analyse von Strukturfaktoren) können über Menüs aufgerufen werden. Das Paket beinhaltet außerdem verbesserte Versionen der Programme DAMMIN und GASBOR für ab initio Oberflächen- und Domänen-Strukturanalyse, sowie SUPCOMB, CRY SOL und MASSHA für „Rigid-Body“-Modellierungen, CREDO für die Hinzufügung von Schleifen oder Domänen zu makromolekularen Modellen und OLIGOMER für die Analyse von Mischungen.

Die Grenzen der ultrahoch aufgelösten Proteinkristallographie

Ultrahoch aufgelöste Proteinkristallographie öffnet eine neue Dimension in der makromolekularen Strukturforschung mit einer Auflösung von 0.8 Å oder höher. Diese Proteinstrukturen liefern Erkenntnisse, die wichtig für das Verständnis der Funktion der Proteine sind, wie zum Beispiel mechanistische Untersuchungen der Katalyse auf elektronischer Ebene. Dieses Wissen kann in der Pharmazie oder Biotechnologie angewandt werden.

In einer Veröffentlichung wurde über die Evaluierung von Daten des kleinen 46-Aminosäuren-Proteins Crambin bis zu 0.54 Å Auflösung berichtet. Dieses Protein kommt in den Samen der Pflanze *Crambe abyssinica* vor und ist homolog zu Membran-aktiven Pflanzentoxinen. Die physiologische Funktion des Proteins ist noch immer unbekannt. Gereinigtes Protein besitzt erstaunliche Eigenschaften: es ist extrem hydrophob und weist, obwohl die Kristalle kaum Defekte aufweisen, einen hohen Grad von molekularer Fehlordnung auf. Es existiert sogar als Mischung von zwei Isoformen. Nur die Mischung der beiden Isoformen liefert Kristalle von sehr hoher Qualität. Die Auflösung der Daten war, obwohl sie die höchste jemals in der Proteinkristallographie erreichte war, nicht durch die Streuung des Kristalls, sondern durch die Geometrie der BW7A-Messstation limitiert. Die Verfeinerung der Struktur gegen die 0.54 Å Daten zeigte Details in der Elektronendichte, die noch nie zuvor für ein Biomolekül erreicht werden konnten (Abb. 72). Es war das erste Mal, dass die so genannte Multipol-Verfeinerung auf ein Protein angewandt wurde, bei der die einzelnen Atome nicht lediglich als Kugeln behandelt werden. Bei ultrahoher Auflösung spielen die nicht-sphärischen Komponenten der Atomformen eine wesentliche Rolle, und so konnten nicht-bindende Elektronen und die Valenzelektronenverteilung in den Peptidebenen direkt visualisiert werden. Dies liefert ein realistisches Bild von der elektronischen Situation im Protein und wertvolle Informationen über die Oberflächeneigenschaften. Es ermöglicht, die Charakteristiken des Proteins zu einem extrem hohen Grad an Genauigkeit darzustellen.

Um die Grenzen noch weiter zu erforschen, wurde die Gelegenheit genutzt, eine Undulator-Messstation am

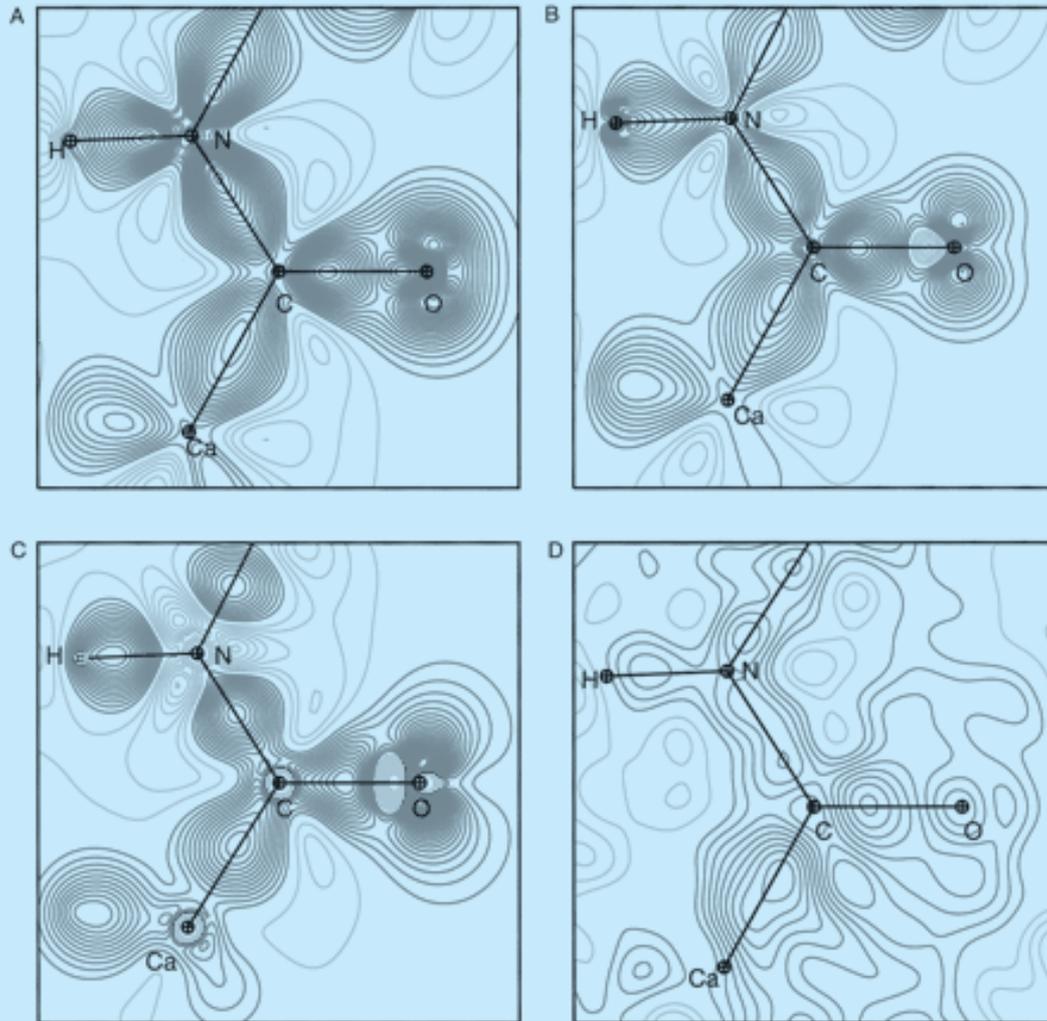


Abbildung 72: Elektronendichte nach Multipol-Verfeinerung gegen die 0.54 Å Daten.

PETRA Ring auszuprobieren, die wegen ihrer Strahlcharakteristik noch nicht für Proteinkristallographie verwendet wird. Die Messstation ermöglichte die Anwendung kurzer Wellenlängen bei hoher Intensität und war mit einem Mar-CCD Detektor und einem 6-Kreis-Diffraktometer ausgerüstet (Abb. 73). Der Detektor war so montiert, dass man ihn sowohl senkrecht als auch um 45 Grad geneigt einsetzen konnte. Daten wurden bei einer Wellenlänge von 0.55 Å gesammelt, mit einer Belichtungszeit von 60 sec pro 0.15°. Reflexe konnten bis zu einer Auflösung von 0.43 Å beobachtet werden.

Wegen der Geometrie der Detektoranordnung war es nötig, zwei oder mehr Datensätze von einem Kristall in verschiedenen Orientierungen zu sammeln, da die Symmetrie niedrig war (Raumgruppe P21). Die prozessierten Daten waren bis zu einer Auflösung von 0.48 Å zu 90% komplett. Der niedrigere Auflösungsbereich wurde von dem zuvor gemessenen 0.54 Å Datensatz hinzugefügt. Der gesamte Datensatz beinhaltet ungefähr 40% mehr Reflexe. Die Verfeinerung der Struktur wird zur Zeit begonnen mit dem Ziel, mehr über feine elektronische Details in der Struktur zu lernen.

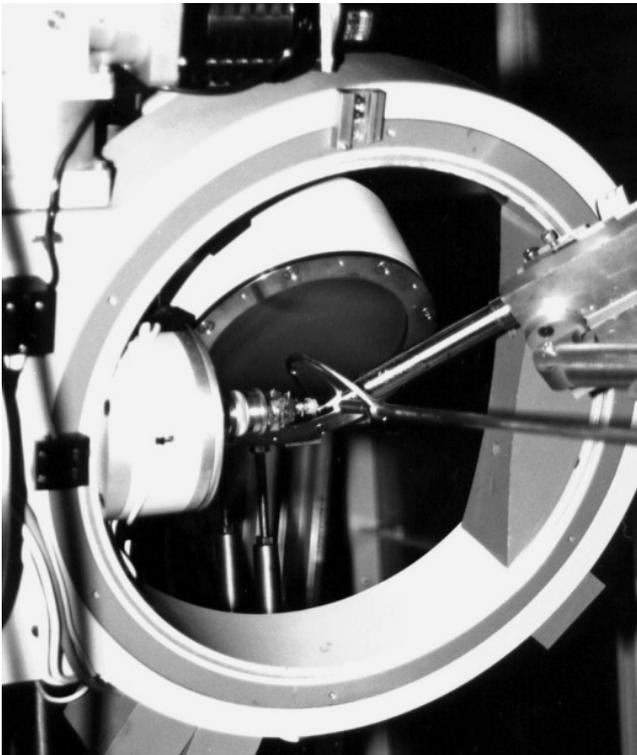


Abbildung 73: Aufbau der PETRA-Messstation für die Crambin-Datensammlung.

Moduläre Domänen in der Signaltransduktion

Praktisch alle biologischen Prozesse werden durch Protein-Protein Wechselwirkungen gesteuert, die von modulären Proteindomänen ausgehen. Die Klasse der so genannten Src Homology 3 (SH3) Domäne gehört zu einer der am besten untersuchten Signaltransduktionsdomänen. Trotz ihrer weiten Verbreitung in zellulären Systemen scheint deren Funktion auf die stöchiometrische, singuläre Protein-Protein Wechselwirkung beschränkt zu sein. Gemeinsam ist diesen SH3-Domänen ein Oberflächensegment zwischen zwei charakteristischen Schlaufen, das ein konserviertes (Pro-X-X-Pro)-Sequenzmotiv in Polyprolin-TypII Konformation von Proteinliganden bindet.

Ein neues Forschungsprojekt an einer SH3-Domäne aus Hefe resultierte aus einem Europäischen Forschungsverbund, der sich zum Ziel gemacht hat, die verschiedenen biologischen Funktionen von SH3-Domänen in diesem Organismus mit verschiedenen Proteomik-orientierten Methoden zu untersuchen. Eine der Aufgaben dieses Verbundes ist die Erstellung einer strukturellen Datenbasis von SH3-Domänenstrukturen und ihren Liganden mit Hilfe von führenden Strukturbiologiemethoden, der NMR-Spektrometrie und Kristallographie mit Hilfe von Synchrotronstrahlung. Dies soll mit standardisierten Methoden für alle notwendigen Schritte, von der Klonierung bis zur verfeinerten Struktur, erfolgen. Von den 29 bekannten SH3-Domänen aus Hefe wurden bis jetzt zwei Strukturen gelöst (Abp1, Pex13p). Zwei weitere Strukturen sind derzeit in Bearbeitung, Myo5 (Univ. La Sapienza, Rom) und Myo3 (Mill Hill, London), und eine Reihe von weiteren SH3 Domänen wird derzeit in Hamburg isoliert.

Von besonderem Interesse war die Struktur der Pex13p-SH3-Domäne, weil sie, im Gegensatz zu anderen SH3-Domänen, zwei Liganden (Pex5p, Pex14p) an unterschiedlichen Oberflächenbereichen bindet (Abb. 69). Die Proteine Pex5p, Pex13p und Pex14p bilden einen Kernkomplex, der als Rezeptor für Proteine dient, die in so genannte Peroxisomen eingeschleust werden. Peroxisomen sind Zellorganellen, in denen biochemische Prozesse, wie zum Beispiel der Abbau von Fettsäuren, stattfinden, die eine räumliche Trennung von anderen Prozessen erfordern. Durch kombinierte Anwendung von NMR-Spektroskopie (EMBL Heidelberg) und Kristallographie (EMBL Hamburg) wurde die genaue Topographie der beiden Bindungsstellen für Pex5p und Pex14p auf der Oberfläche der Pex13p SH3-Domäne bestimmt. Während Pex14p in die bekannte Bindungstasche für Liganden in Polyprolin-TypII-Konformation bindet, bindet Pex5p in α -helikaler Konformation an einen Oberflächenbereich, der gegenüberliegend zur Pex14p-Bindungsstelle ist. Ein zukünftiges Forschungsziel wird es sein, die Strukturen der vollständigen binären und ternären Protein-Proteinkomplexe, bestehend aus Pex5p, Pex13p und Pex14p, zu bestimmen und somit die molekularen Grundlagen von Proteinimport in Peroxisomen zu verstehen.

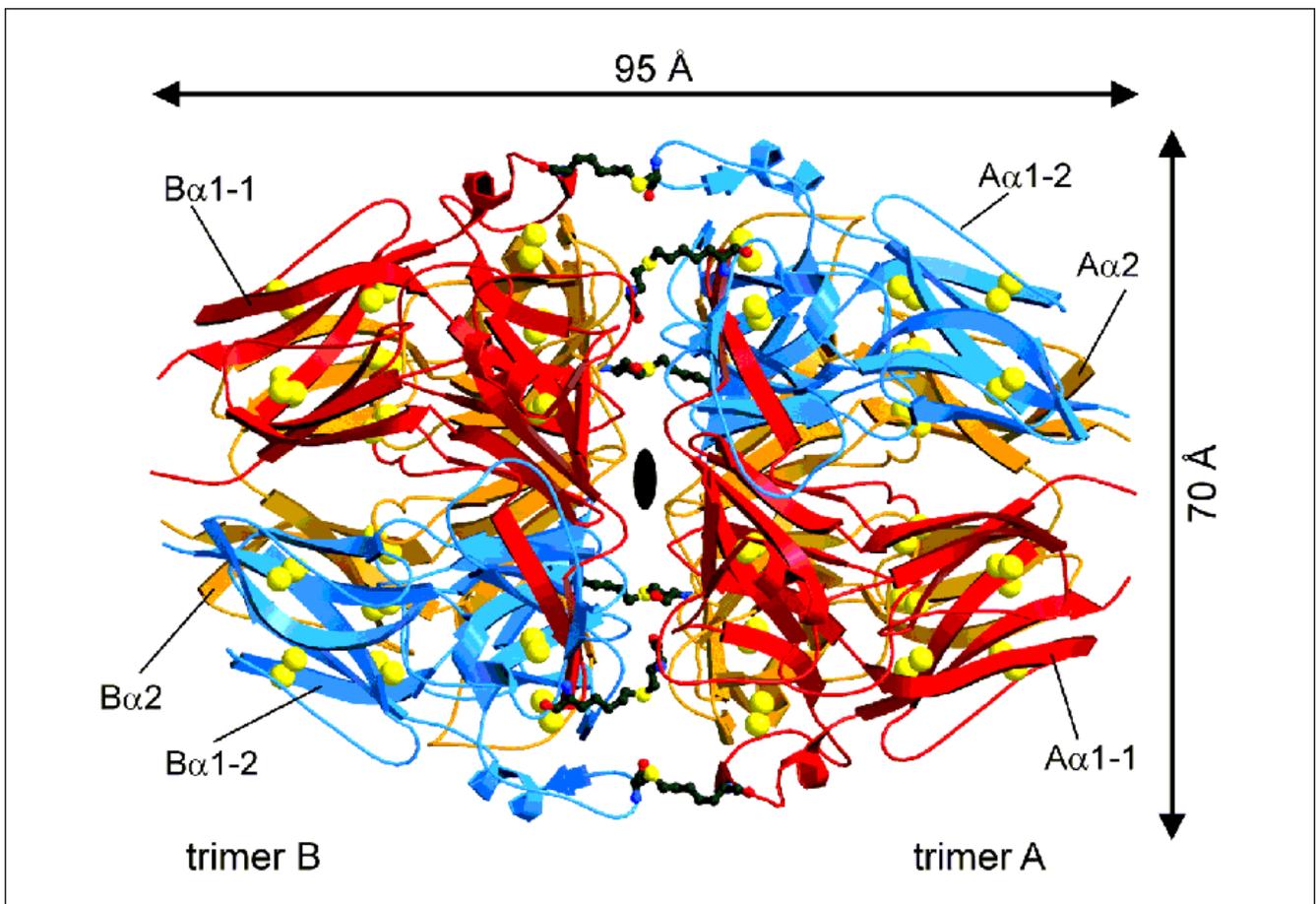


Abbildung 74: Struktur der NCI-Domäne von menschlichem Placenta-Collagen IV. Die Abbildung zeigt ein NCI-Hexamer. Die Struktur wurde auf der Grundlage einer adhoc-Präparation von Bromderivaten und MAD-Phasierung an der K-Kante von Brom gelöst. (Quelle: Than et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA 99 (2002) 6607)

Max-Planck-Gesellschaft

Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie

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

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

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

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

Forschungsschwerpunkte

Proteindynamik

Die MPG-Arbeitsgruppe für Proteindynamik untersucht Struktur-Funktionsbeziehungen von Proteinen. Sie setzt dabei Methoden der Proteinkristallographie bei ultrahoher Auflösung, der Kryokristallographie sowie der zeitaufgelösten Röntgenbeugung ein. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von Methoden anomaler Phasenlösung und ihre Anwendung auf de-novo-Bestimmungen von Proteinstrukturen. Die Gruppe betreibt eine Messstation an der Wiggler-Beamline BW6 an DORIS.

Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten lag bei der weiteren Entwicklung von Verfahren experimenteller Phasierung. Mit Hilfe anomaler Streuung bei einer Röntgenwellenlänge (SAD-Methode) bzw. bei mehreren Wellenlängen (MAD) wurde eine Reihe neuer Proteinstrukturen aufgeklärt. Ein wichtiges Beispiel stellt die Struktur der nichtkollagenen (NC1) Domäne von Kollagen IV aus menschlicher Plazenta dar. Adhoc-Derivatisierung mit Natriumbromid und der Einsatz anomaler Streuung an der Br-K-Kante löste das Problem der Nichtisomorphie von Kristallen, das eine Bestimmung der Struktur trotz langjähriger Bemühungen bisher verhindert hatte. Die Struktur (Abb. 74) ist insbesondere von Bedeutung für die Untersuchung bestimmter Krankheiten auf molekularer Ebene; dazu gehören die Goodpasture- und Alport-Syndrome.

Ein weiterer Schwerpunkt lag bei der Entwicklung von Verfahren und Techniken zur Automatisierung der Beugungsmessungen und ihrer Auswertung. Damit wurden wesentliche Voraussetzungen für die Lösung von Proteinstrukturen in HT („High Throughput“) Verfahren und damit für Anwendungen in der Strukturgenomik an der Beamline BW6 geschaffen. Weitere Schritte der Entwicklung zielen insbesondere auf eine Automatisierung der Beurteilung der Kristallqualität, der Bestimmung der Kristallklasse sowie der Wahl der Messstrategie für HT-Strukturlösung mit SAD/MAD-Phasierung; diese Schritte bedürfen bisher der Intervention durch erfahrene Proteinkristallographen.

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

Zytoskelett

Die MPG-Arbeitsgruppe „Zytoskelett“ befasst sich mit der Stukturbestimmung von Proteinen des Zytoske-

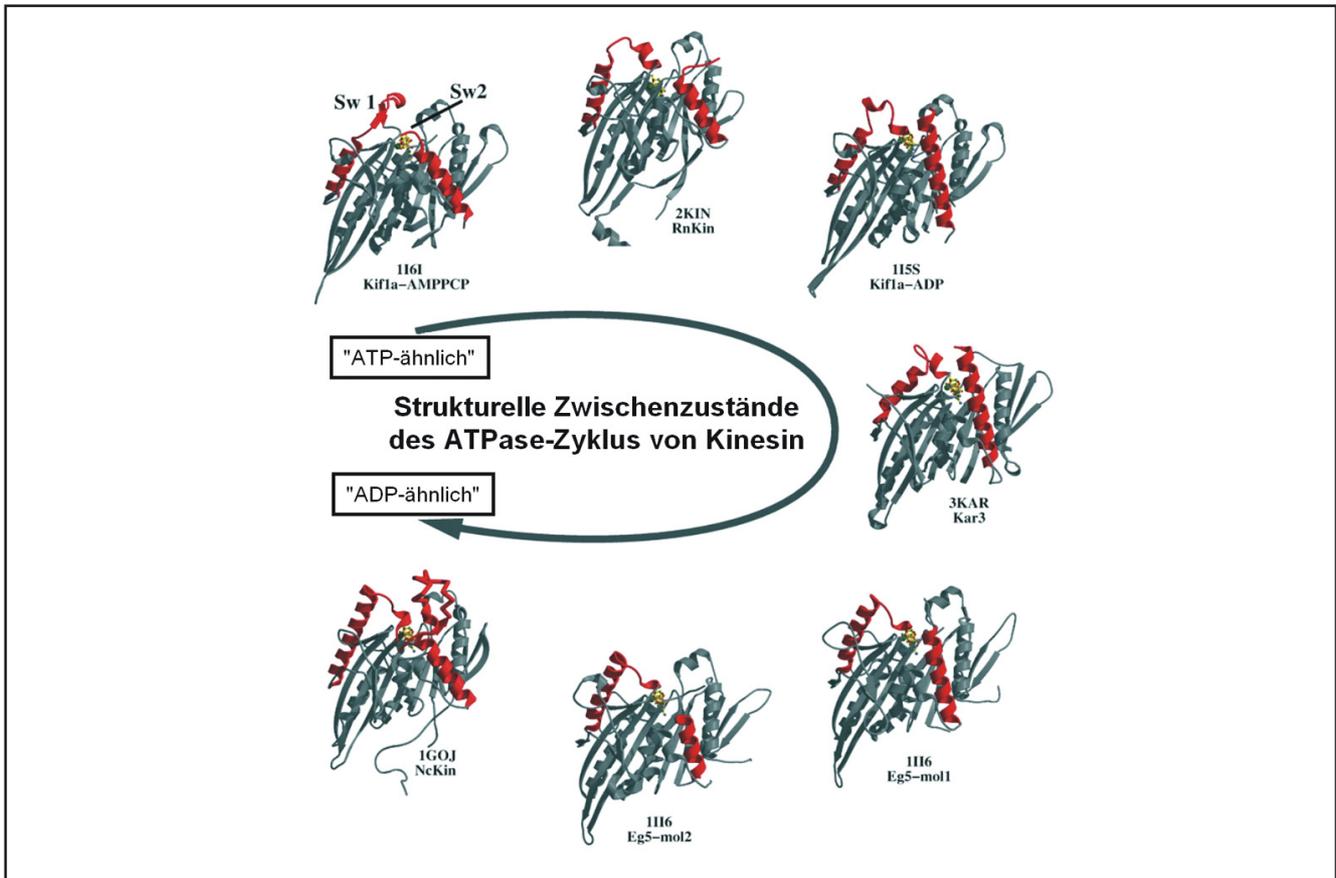


Abbildung 75: Die Zusammenstellung verschiedener Strukturen von Kinesin und verwandten Motorproteinen in einheitlicher Orientierung verdeutlicht die Unterschiede in den variablen Bereichen an der Oberfläche der Motordomäne. Besonders hervorgehoben sind die Schalter-Regionen („Switch-Regionen“, Sw1 und Sw2) mit den sich anschließenden Helizes, die in Länge und Ausrichtung relativ zum Kern der Motordomäne variieren.

letts mit Hilfe der Synchrotronstrahlung, insbesondere mit der Untersuchung des Struktur-Funktions-Zusammenhangs von Mikrotubuli und den damit assoziierten Proteinen. Mikrotubuli sind Proteinfasern, die zusammen mit anderen Komponenten des Zytoskeletts für die äußere Gestalt der Zellen und für die innere räumliche Organisation der subzellulären Bestandteile verantwortlich sind. Mikrotubuli sind dabei keineswegs statisch und unveränderlich, wie der Ausdruck „Zytoskelett“ vermuten lässt, sie besitzen vielmehr eine hohe Dynamik und können sich daher rasch an die sich ändernden Erfordernisse anpassen. Die Steuerung der Mikrotubuli-Dynamik geschieht durch den Einfluss anderer Proteine, die mit den Mikrotubuli direkt (MAPs – Mikrotubuli-Assoziierte Proteine) oder indirekt inter-

agieren. Andererseits dienen Mikrotubuli als Schienen für intrazelluläre Transportvorgänge und nehmen dadurch selbst Einfluss auf die innere Dynamik der Zellen. Prominente Beispiele für solche Prozesse, bei denen Mikrotubuli eine wichtige Rolle spielen, sind die Trennung der Tochterchromatiden bei der Zellteilung und die Bildung von Zellfortsätzen (Axone, Dendriten) bei der Differenzierung von Nervenzellen.

Aktive Elemente beim Mikrotubuli-basierten Transport sind die Motorproteine aus der Familie der Kinesine. Das so genannte „konventionelle Kinesin“, der Hauptvertreter der Kinesine, besteht aus zwei schweren und zwei leichten Peptidketten. Jede der beiden schweren Ketten hat eine etwa 350 Aminosäuren umfassende

globuläre „Motordomäne“. Diese Motordomänen binden an die Oberfläche der Mikrotubuli und wandeln chemische Energie in Form energiereicher Moleküle (ATP – Adenosintri-phosphat) in gerichtete Bewegung um. In der MPG-Arbeitsgruppe „Zytoskelett“ wurde vor einiger Zeit die Struktur der Motordomäne aus Rattenkinesin in monomerer und dimerer Form bestimmt. Mittlerweile sind etwa 15 Röntgenstrukturen von Motordomänen verschiedener Kinesine bekannt, unter anderem von menschlichem Kinesin sowie von nicht-konventionellen Kinesinen aus verschiedenen Organismen. Durch den Vergleich dieser Strukturen konnten Einblicke in die Funktionsweise der molekularen Motoren gewonnen werden.

Aufschlussreich ist dabei die Struktur des schnellen Pilzkinesins NcKin (*Neurospora crassa* Kinesin), die zuletzt in der Arbeitsgruppe „Zytoskelett“ gelöst wurde. Kleine strukturelle Änderungen in der ATP-Bindungstasche, hervorgerufen durch die Hydrolyse von ATP, werden durch ein Netzwerk von Salzbrücken verstärkt und auf eine Region übertragen, die für die Bindung an die Mikrotubuli-Oberfläche wichtig ist („Switch2-Region“, Abb. 75). Dadurch wird die Festigkeit der Bindung zwischen Motordomäne und Mikrotubuli-Oberfläche im Takt der ATP-Hydrolyse moduliert. Gleichzeitig führt die Verschiebung der „Switch2-Region“ zu einer Konformationsänderung in einer benachbarten Region, die mit der zweiten Motordomäne in Kontakt steht und damit für die Kommunikation zwischen den beiden Motordomänen verantwortlich ist. Dies erklärt die Koordinierung der Aktivitäten beider Motordomänen, was für eine „reibungsfreie“ Bewegung des zusammengesetzten Kinesin-Motors unerlässlich ist. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist der Ersatz der Spaltprodukte des ATP durch frisches ATP. Im Vergleich mit den anderen Kinesinen hat das schnelle Pilzkinesin eine ATP-Bindungstasche, die weiter geöffnet ist, so dass der Austausch von ADP und ATP schneller erfolgen kann.

Die Funktion der MAPs besteht nach üblichem Verständnis hauptsächlich in einer stabilisierenden bzw. regulativen Wirkung auf das Mikrotubuli-Gerüst der Zelle. In der Arbeitsgruppe „Zytoskelett“ konnte nachgewiesen werden, dass das Tau-Protein, das zur Gruppe der MAPs zählt, nicht nur die Mikrotubuli stabilisiert, sondern auch direkt Einfluss auf den Mikrotubuli-basierten Transport von Vesikeln und anderen Zellorga-

nellen nimmt, indem es die Wechselwirkung zwischen Kinesinen und Mikrotubuli reguliert. Dies wurde durch die Beobachtung der Bewegung einzelner Kinesin-Moleküle mit Hilfe der TIRF-Mikroskopie („Total Internal Reflection Fluorescence“) bestätigt. Dabei stellte sich heraus, dass Tau hauptsächlich die Annäherung des Motorproteins an die Mikrotubuli behindert, während der eigentliche Bewegungsablauf nach erfolgtem Kontakt durch die Anwesenheit von Tau-Molekülen auf der Oberfläche der Mikrotubuli kaum beeinträchtigt wird.

Eine Fehlfunktion des Tau-Proteins kann weitreichende Folgen für die strukturelle Integrität und den Metabolismus der Zelle haben. Bei einigen neuronalen Erkrankungen (FTDP-17, Alzheimer-Krankheit) kommt es aus bisher ungeklärten Gründen zur Aggregation von Tau-Protein zu unlöslichen Fasern und letztlich zum Absterben von Nervenzellen. Um die Ursachen dieser pathologischen Aggregation von Tau-Protein zu klären, wurden in der Arbeitsgruppe „Zytoskelett“ strukturelle Untersuchungen an Tau-Protein in Lösung und an künstlichen Tau-Fasern durchgeführt. Verglichen mit der langsamen Aggregation des Tau-Proteins bei der Alzheimerkrankheit neigen bestimmte Tau-Mutanten der frontotemporalen Demenz besonders stark zur Fibrillenbildung. Unter verschiedenen, teilweise einander ausschließenden Bedingungen (Zugabe von Polyanionen oder Fettsäuren, oxidierende oder reduzierende Bedingungen) erfolgt die Aggregation so schnell, dass sie sich *in vitro* verfolgen lässt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Aggregation von Tau unabhängig von den experimentellen Bedingungen nach einem einheitlichen Strukturprinzip erfolgt. Die beobachteten Unterschiede lassen sich auf die unterschiedliche Kinetik der Teilreaktionen (Aktivierung, Nukleation, Polymerisation) zurückführen. Das Tau-Protein enthält ein Hexapeptid-Motiv, welches von einer ungeordneten Struktur in eine β -Faltblatt-Struktur übergehen kann. Die Umwandlung geschieht zunächst spontan in einem langsamen Prozess. Durch den Kontakt mit bereits umgewandelten Tau-Molekülen wird die Umwandlung beschleunigt. Dabei bilden sich lange Fasern mit einer β -Faltblatt-ähnlichen Struktur.

Für die Suche nach aggregationshemmenden Substanzen für den therapeutischen Einsatz ist es wichtig, ein adäquates *in vitro*-Modell der Tau-Aggregation zur Ver-

fügung zu stellen und ein schnelles, effektives Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, den Einfluss chemischer Verbindungen und anderer Faktoren auf die Faserbildung zu bestimmen. Dazu wurde eine systematische Untersuchung von Tryptophan-Mutanten des Tau-Proteins durchgeführt, in der gezeigt wurde, dass sich die Packung der Tau-Moleküle bei der Faserbildung mit Hilfe der Tryptophan-Fluoreszenz charakterisieren lässt, ohne die Aggregation selbst zu behindern. Damit erscheint die Fluoreszenzanalyse von Tryptophan-Mutanten des Tau-Proteins geeignet für die Suche nach potentiellen Wirkstoffen in groß angelegten Testreihen.

Struktur der Ribosomen

Ribosomen decodieren die Baupläne der Erbsubstanz in jeder Zelle und setzen diese in die Synthese von Proteinen um. Sie bestehen aus zwei Untereinheiten, die jeweils verschiedene Funktionen im Rahmen der Protein-Biosynthese erfüllen. Die kleine Untereinheit (30S in Prokaryonten) ist für die Übersetzung des genetischen Codes verantwortlich. Die große Untereinheit (50S) fügt die einzelnen Aminosäuren zu einer Peptidkette, dem neu zu bildenden Protein, zusammen.

Aufgrund der zentralen Rolle des Ribosoms in der Protein-Biosynthese ist es zugleich das primäre Target der meisten Antibiotika. Da aber der Großteil der Antibiotika heutzutage in der Nahrungsmittelindustrie und nicht zur Behandlung bakterieller Infektionen eingesetzt wird, kommt es in immer größerem und schnellerem Rahmen zu Antibiotika-Resistenzen, während die Neuentwicklung von Medikamenten damit kaum Schritt halten kann. Mit der Strukturaufklärung bakterieller Ribosomen bzw. deren Untereinheiten und Komplexen mit Antibiotika ist den Forschern nun ein Mittel in die Hand gegeben, die vielfältigen Wechselwirkungen detailliert zu verstehen und somit ein gezieltes, kostengünstiges, deutlich beschleunigtes und vereinfachtes Medikamentendesign voranzutreiben.

Im Jahr 2002 wurden weitere Ribosomen-Antibiotika-Komplexe auf kristallographischem Wege analysiert. Azalide und Ketolide sind Antibiotika der neuesten Generation, die durch chemische Modifikation der

Makrolide gewonnen wurden. Makrolide wie Erythromycin, Roxithromycin und Clarythromycin blockieren den Tunneleingang der ribosomalen 50S Untereinheit, durch den die naszierende Proteinkette geführt wird. Der Durchlass wird auf ein Drittel geschmälert, die Protein-Biosynthese stoppt nach wenigen Zyklen, sobald die Proteinkette das Antibiotikum erreicht hat.

Das Ketolid ABT-773 und das Azalid Azithromycin wurden im Micromolarbereich mit der 50S ribosomalen Untereinheit von *Deinococcus radiodurans* co-kristallisiert, die gezüchteten Kristalle wurden schockgefroren und Synchrotronstrahlung ausgesetzt. Die gewonnenen kristallographischen Daten erlaubten Rückschlüsse auf die spezifische Wirkungsweise.

Die Bindestelle des ABT-773 ist im Vergleich zu den Makroliden innerhalb des Tunneleingangs der 50S ribosomalen Untereinheit leicht verschoben, obwohl sich reaktive Molekülanteile perfekt mit denen von Roxithromycin überlagern lassen. Die Verschiebung führt zu vermehrten Kontakten mit verschiedenen Domänen der ribosomalen RNA, die zum Teil mutationsunabhängig sind, was die Aktivität gegen bestimmte Makrolid-resistente Phänotypen erklärt.

Azithromycin ist eines der wenigen Antibiotika, die im Spätstadium von Aids eingesetzt werden können. Aus der Elektronendichte des Azithromycin-Ribosom-Komplexes gingen überraschenderweise zwei Bindestellen innerhalb des ribosomalen Tunnels hervor (Abb. 76). Das zweite Azithromycin-Molekül bindet nicht nur an die ribosomale RNA, sondern auch an zwei ribosomale Proteine, die die Makrolid-Resistenz zur Folge haben.

Des Weiteren wurden kristallographische Untersuchungen zur Dynamik der Protein-Biosynthese, speziell der Peptid-Bindung und der Translokation, durchgeführt. Im Laufe des Elongationszyklus passiert jede Transfer-RNA (tRNA), die die einzelnen Aminosäuren an das Ribosom liefert, drei (A→P→E) ribosomale Bindestellen, abhängig von der Konformation des Ribosoms. Im prätranslokalen Zustand befinden sich je eine tRNA in A- und P-Bindestelle, während im posttranslokalen Stadium die P- und E-Stelle besetzt ist. Die korrekte Lagerung der Aminosäure-beladenen tRNA in der A-Stelle stimuliert den Flip des CCA-Endes der

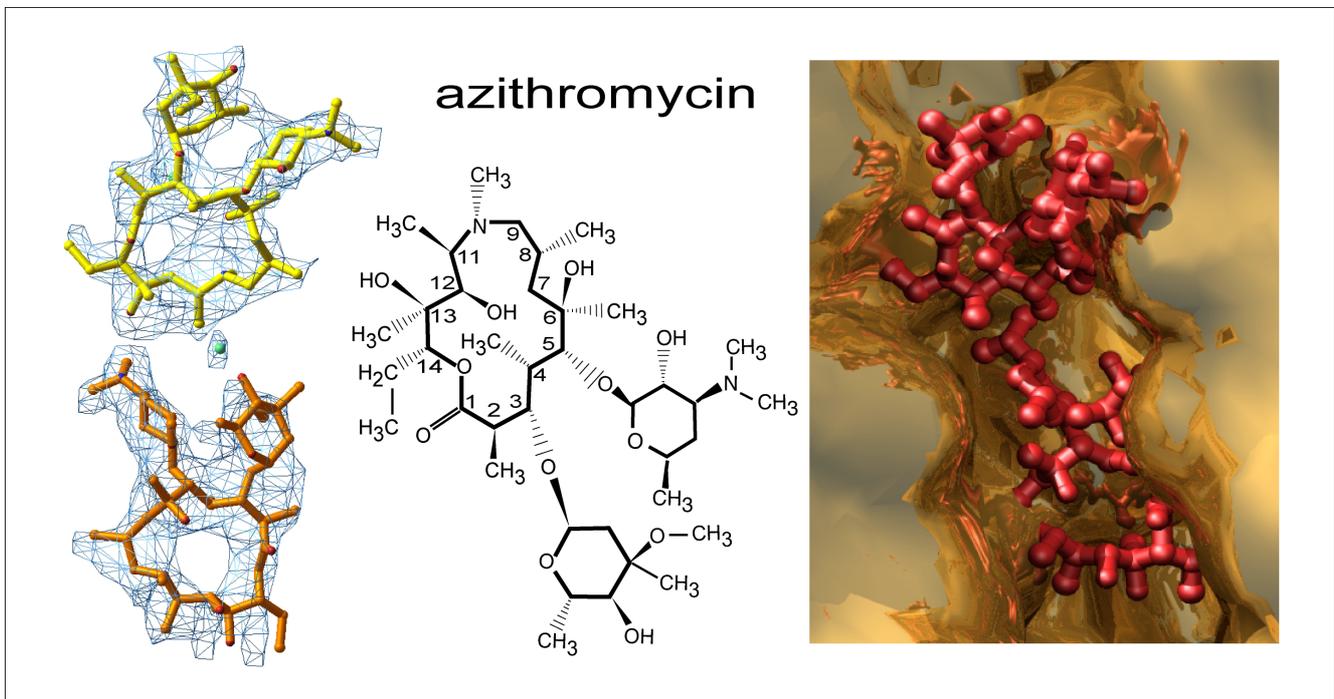


Abbildung 76: Der erste strukturelle Nachweis für eine zweite Bindestelle eines Makrolid Antibiotikums am Ribosom. Links: Elektronendichte für zwei an die ribosomale 50S Untereinheit von *Deinococcus radiodurans* gebundene Azithromycin Moleküle. Mitte: Chemische Darstellung von Azithromycin. Rechts: Die zwei Moleküle blockieren den – in dieser Darstellung aufgeschnittenen – Tunnel.

A-Stellen-tRNA in die Position des 3'-Endes der P-Stellen-tRNA bei nahezu gleichzeitiger Peptidbindung. Diese Bewegung resultiert in einem naszierenden Peptid, das in den Eingang des Tunnels zeigt und der Translokation der entladenen P-Stellen-tRNA in die E-Stelle.

Kristallstrukturen ribosomaler Komplexe, bestehend aus der 50S ribosomalen Untereinheit von *Deinococcus radiodurans* mit verschiedenen Substratanalogen, die den tRNA-Akzeptorstamm und das CCA-3'-Ende

der A-Stellen-tRNA imitieren, und dem Antibiotikum Sparsomycin wurden in molekularer Auflösung analysiert. Es gelang nicht nur, den Bindungsmodus der Substratanalogen und des Inhibitors aufzuklären, sondern auch dynamische Elemente innerhalb des Peptidyltransferasezentrums zu definieren. Innerhalb dieses Zentrums konnte eine 180 Grad Rotationsachse gefunden werden, woraus sich der Vorschlag einer allgemeinen Ribosomenmaschinerie für die Peptidbindung, die Translokation und das Anwachsen der naszierenden Peptidkette ergab.

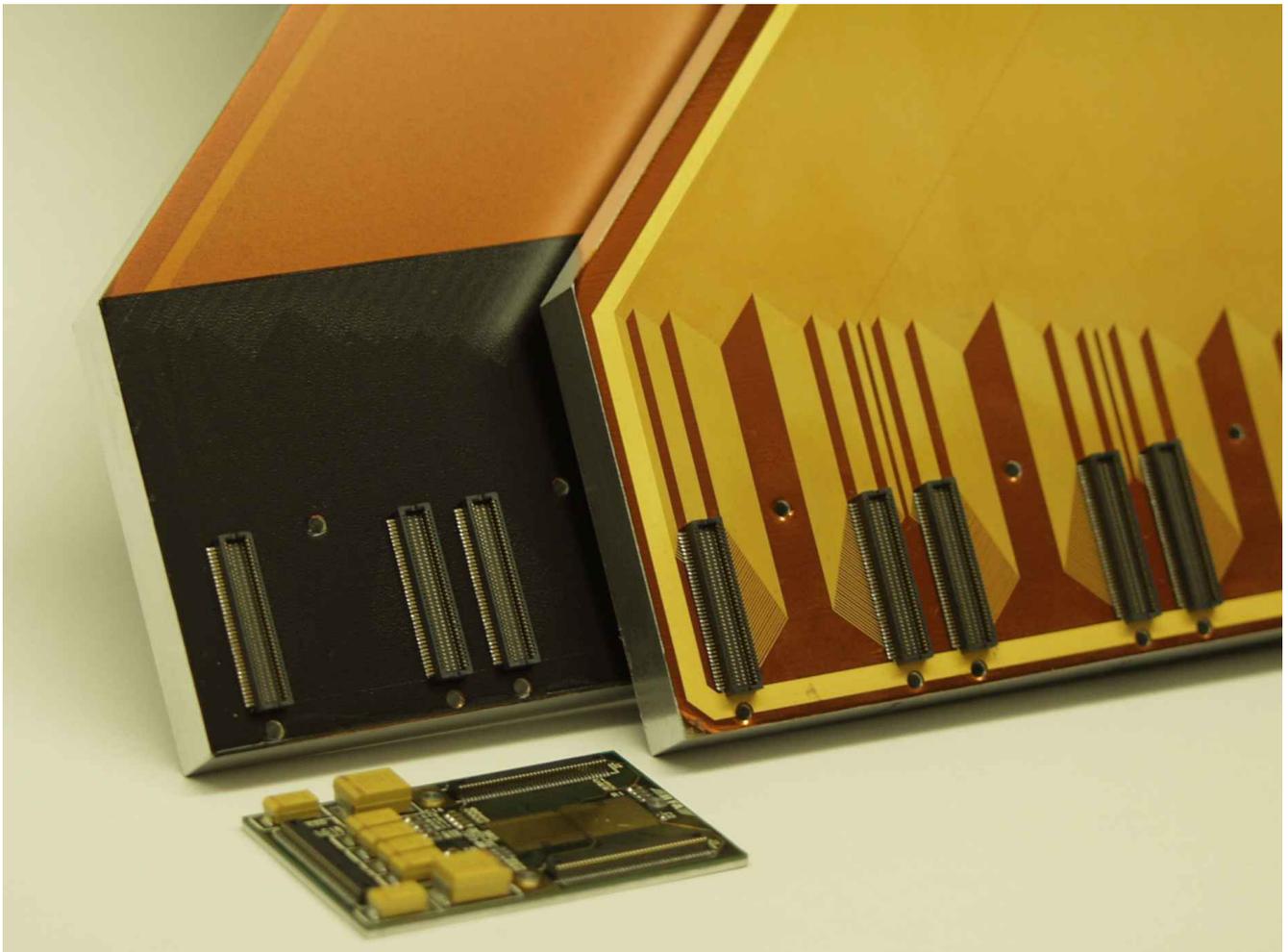


Abbildung 77: Prototyp der Anodenplatte mit hybridem Schaltungsträger der Ausleselektronik.

Elektronik-Entwicklung

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

Projekte

HERMES Silicon Recoil Detektor

Seit dem zweiten Quartal des Berichtsjahres beteiligte sich die Gruppe FEC an der Entwicklung des HERMES Silicon Recoil Detektors. Zum Nachweis von Protonen sollen doppelseitige Silizium-Streifendetektoren (SSD) verwendet werden, die in zwei Ebenen parallel zur Strahlachse im HERA-Strahlrohr angeordnet sind.

Von FEC wurde der Entwurf für den Aufbau des Detektormoduls und der elektrischen Kontaktierung der SSDs mit der analogen Ausleseelektronik, basierend auf HELIX ICs, erstellt. Besondere Berücksichtigung fanden die Vakuumtauglichkeit (10^{-9} mbar), eine Strahlentoleranz bis zu 300 krad (γ -Strahlen, Gesamtlebensdauer des Experiments) sowie die erforderliche Kompaktheit des Moduls für den Einsatz innerhalb des Strahlrohres.

Pro Detektormodul werden zwei SSDs mit je 128 Streifen auf der Vorder- und Rückseite nebeneinander auf einen Rahmen geklebt. Um Leckströme der einzelnen Streifen des SSDs über den Detektorrahmen zu vermeiden, wurde als Material eine elektrisch nicht leitfähige AlN-Keramik gewählt. Die elektrische Verbindung mit der Ausleseelektronik (HELIX Chips auf einem 4-Lagen-Hybrid) erfolgt durch 50 μm dicke Polyimidfolien in Verbindung mit einem ebenfalls keramischen Pitch-Adapter. Die elektrische Verbindung zwischen den Flexfolien und den darunter liegenden SSDs erfolgt

durch konventionelle Bondverbindungen. Jeder Kanal ist mit zwei Eingängen des HELIX Chips verbunden, in einem Fall über eine Koppelkapazität. Mit dieser asymmetrischen Aufteilung der Signalladung auf die beiden HELIX Eingänge wird der Dynamikbereich des einen Eingangs von 11 MIP auf etwa 70 MIP (Minimum Ionizing Particle) erweitert. Die Rückseiten der Detektoren werden in ähnlicher Weise auf der Modulunterseite kontaktiert. Von dem in Abbildung 77 gezeigten Aufbau sollen später acht Module um den Kollisionspunkt angeordnet werden. Ein erster Prototyp des Detektormoduls wird für den Sommer 2003 erwartet.

Si-Driftdetektorsystem

Im Berichtsjahr wurden von der Gruppe FEC mit dem Si-Driftdetektorsystem an HASYLAB Beamlines (CEMO und X1) Messungen von Fluoreszenzspektren durchgeführt. Dabei wurden 7-zellige Si-Driftdetektoren (SDD) verwendet, deren Technologie und Layout den später Verwendung findenden 61-zelligen Detektoren entspricht. Für die Auslese und Aufbereitung der Detektorsignale wurde ein erster Prototyp der bei FEC entwickelten, integrierten Ausleseschaltung (ASIC) verwendet. Einzelheiten der Systemkomponenten können den Jahresberichten der vergangenen Jahre entnommen werden. Ziel der durchgeführten Experimente war die Charakterisierung der Detektoren und des Auslesechips. Dabei wurden Fluoreszenzspektren von 3.5 keV bis 15.7 keV bei Raten bis zu 600 000 Einträgen pro Sekunde (kcts/s) pro Zelle und im Raumtemperaturbereich zwischen 19°C und 25°C gemessen.

Der linke Teil in Abbildung 78 zeigt beispielhaft ein Cu-Fluoreszenzspektrum mit den charakteristischen Linien bei 8.048 keV (Cu- K_{α} -Linie) und 8.905 keV (Cu- K_{β} -Linie). Das Spektrum entstand bei einer Rate von etwa

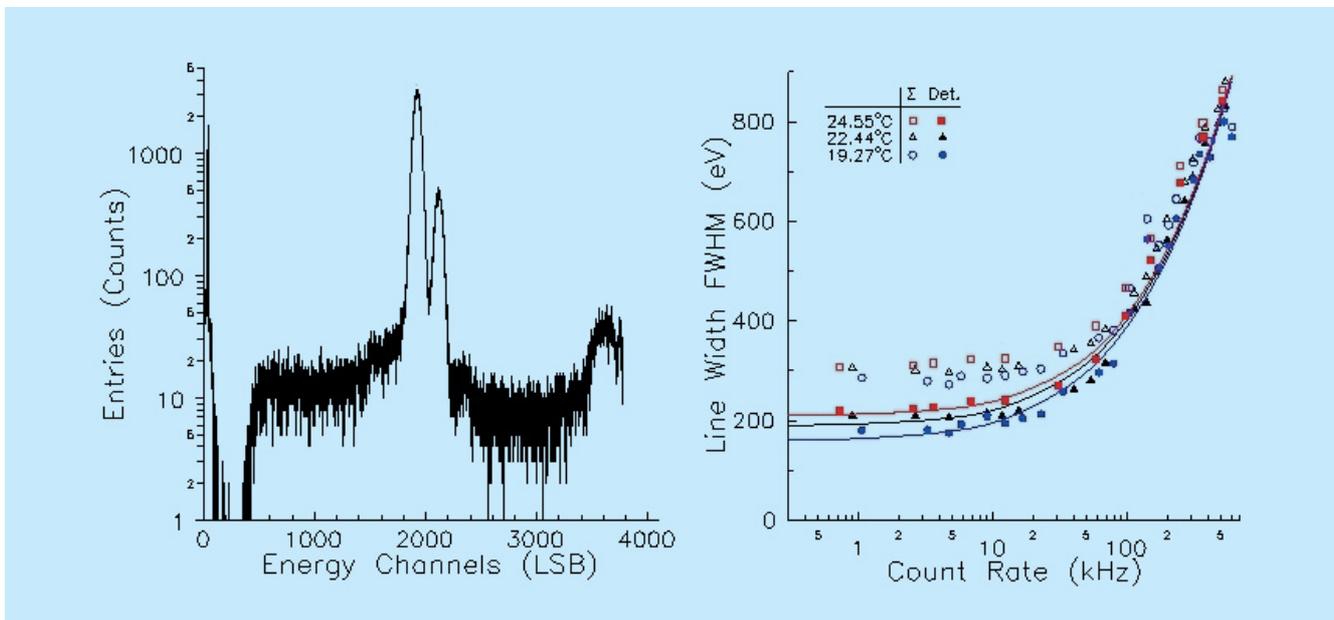


Abbildung 78: Cu-Fluoreszenzspektrum bei 40 kcts/s (links) und Linienbreiten über der Zählrate (rechts).

40 kcts/s und der Temperatur 22.44°C. Bis zu Raten von 50 kcts/s bleibt die Linienbreite nahezu konstant bei etwa 300 eV. Darüber hinaus steigt die Linienbreite mit zunehmender Rate an und erreicht bei 600 kcts/s etwa 800 eV. Hervorgerufen durch einen kontinuierlichen Rücksetzmechanismus des SDD war eine Verschiebung des gesamten Spektrums mit zunehmender Rate und Energie zu beobachten. Die Nichtlinearität der Verstärkung des Gesamtsystems ist jedoch kleiner als 1%. Die Verschiebung des Spektrums lässt sich elektronisch kompensieren. Dies und eine Verbesserung des Rauschverhaltens bei hohen Raten oberhalb von etwa 50 kcts/s erfordert eine Überarbeitung und Ergänzung des ASICs.

Gasdetektorsystem SAXS

Die Entwicklung des Messaufnehmers mit 1280 Kanälen (Anoden) wurde in der Gruppe FEC im Berichtsjahr abgeschlossen. Die dazugehörige Hybridschaltung für die Detektorauslese wurde ebenfalls angefertigt. Die 1280 streifenförmigen Cu/Ni/Au-Anoden sind auf einer Kaptonfolie mit einem Pitch von 150 µm angeordnet. Die Leiterbahnen werden in Mikrofeinleitertechnik

strukturiert. Die Kaptonfolie ist ganzflächig auf einer 10 mm dicken Al-Platte laminiert.

Je 128 Kanäle werden von der hybrid aufgebauten Ausleseelektronik weiterverarbeitet. Diese wird mit zwei 80-poligen Feinstleiter-Steckverbindern mit dem Messaufnehmer verbunden. Für die Signalverstärkung und Signalfilterung werden pro Hybrid zwei 64-kanalige ASICs (JAMEX) eingesetzt.

Die Rausch- und Übersprecheigenschaften des Messaufnehmers sind wesentlich durch Leckströme, Last- und Koppelkapazitäten der Anodenstrukturen bestimmt. Die Messaufnehmer werden daher einer besonderen mehrstufigen Reinigungsprozedur unterzogen. Danach ergibt sich der elektrische Widerstand zwischen benachbarten Anoden im Mittel zu 5 TΩ, was unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen zu Leckströmen kleiner 10 fA führt. Die Kapazität einer Anode gegen Messerde variiert aufgrund der unterschiedlichen Leiterbahnlängen zwischen 15 pF und 18 pF. Die mittlere Koppelkapazität zwischen zwei Anoden beträgt 12 pF.

Abbildung 77 zeigt Ausschnitte des Messaufnehmers mit den Steckverbindern (rechts in nackter Form, links

mit Lötstopp im Bereich der Steckverbinder und aufgelegter Kaptonfolie im restlichen Bereich) sowie einen zugehörigen, hybriden Schaltungsträger. Der Messaufnehmer befindet sich gegenwärtig in der Serienfertigung und soll im kommenden Jahr mit hybrider Ausleseelektronik den Projektpartnern zur Verfügung stehen.

Strahlverlustmonitore für die TESLA Test Facility (TTF2)

Bei TTF2 sollen Strahlverluste mit Szintillatoren und Photomultipliern (PMT) sowie Sekundärelektronenvervielfachern (SEV) nachgewiesen werden. Deren Ausgangssignale geben Rückschlüsse auf technische Fehler und zu hohen Strahluntergrund und können als Auslöser für Alarm und die damit verbundene Abschaltung des Beschleunigers dienen. Die Gruppen FEA und FEB haben im Berichtsjahr in Zusammenarbeit mit den Gruppen MDI und MVP die Spezifikationen erarbeitet und erste Baugruppen entwickelt.

Die PMTs und SEVs sind im radioaktiven Strahlungsfeld der TTF positioniert und haben bis zu 100 m lange Verbindungsleitungen zur Auswerteelektronik. Diese Randbedingung erforderte die Entwicklung einer differentiellen Übertragung auf einem twisted-Pair Kabel. Die Signalsender sind in die Hochspannungsverteiler am PMT/SEV integriert. Da dort ein hohes Strahlungsfeld erwartet wird, können dort Halbleiter nicht eingesetzt werden. So konnte der Common-Mode des Senders nur für den hochfrequenten Anteil unterdrückt werden. Diese Baugruppe ist so weit entwickelt, dass die Serienproduktion begonnen werden kann. Für den Empfänger wurde die Schaltung entworfen, die im Common-Mode unempfindlich ist.

Die Ansteuerung und Auslese erfolgt über VMEBus. Hierzu wurden drei unterschiedliche VMEBus Platinen entwickelt. Die erste bereitet die von TTF bereitgestellten Kontrollsignale auf, verteilt sie an die weiteren Komponenten des Strahlverlustmonitors und stellt den TTF-Status über den VMEBus der Datennahme zur Verfügung. Eine zweite Karte dient als Alarmgenerator, der die PMT/SEV-Signale mit gespeicherten Schwellen vergleicht. Alarmkriterien sind technische Fehler, einzelne hohe Pulse und ganze Pulsfolgen. Die dritte Baugruppe dient als Testpulsgenerator zur Überprüfung

der gesamten Signalkette. Die Höhe der Pulse und die Verzögerungszeit gegenüber den TTF-Kontrollsignalen kann eingestellt werden. Die Testpulse werden an den PMT gesandt und erzeugen dort, galvanisch getrennt, einen Lichtpuls oder Ladungspuls.

Mit den Erfahrungen aus der Arbeit mit den PMTs und der Signalübertragung wurde die Zeuthener Gruppe bei ihrer Entwicklung der Szintillatoren für die Fast-Wire-Scans unterstützt.

Beam Interlock Concentrator (BIC) für TTF2

Die Energie des TTF2-Strahls kann bei Strahlverlust dauerhafte thermische Schäden an Beschleunigerkomponenten verursachen, wenn nicht schnellstmöglich die Strahlquelle abgeschaltet wird. Die Gruppe FEB entwickelt in Zusammenarbeit mit der Gruppe MDI eine Abschaltetelektronik (BIC) mit einer möglichst kurzen Durchlaufzeit von wenigen hundert ns. Dazu wird ein modulares Konzept umgesetzt, mit dem durch Kaskadierung eine Vielzahl von Eingängen (Alarmen) verarbeitet und auf zwei Ausgänge konzentriert wird. Jedes einzelne Modul verfügt über 16 Eingänge.

Im Berichtsjahr wurden in Zusammenarbeit mit der Gruppe MDI die Spezifikationen erarbeitet und erste Baugruppen entworfen. Derzeit existiert für den Alarmempfänger ein Prototyp, der mit einem galvanisch entkoppelten Eingang auch hohe Störsignale verarbeiten kann, wie sie aufgrund der großen Entfernungen und der großen geschalteten Leistungen innerhalb der TTF auftreten können. Die Verwendung differentieller Signale (RS422) hält störende Wechselwirkungen mit anderen elektrischen Geräten klein. Dieser Alarmempfänger trägt zur Durchlaufzeit durch ein Modul nur mit 11 ns bei. Die Schaltungen für den Treiber des Alarmausgangs und den Empfänger der TTF-Kontrollsignale sind bereits entwickelt.

Laser-Synchronisation für TTF

Um das longitudinale Strahlprofil zu messen, wird das abgestrahlte elektromagnetische Feld mit Hilfe eines elektrooptischen Kristalls vermessen. Hierzu wird mit

einem Infrarotlaserstrahl, der auf die 1.3 GHz des TTF Beschleunigers synchronisiert ist, der Kristall zu dem Zeitpunkt bestrahlt, der der gewünschten longitudinalen Position innerhalb des Bunches entspricht.

Diese Synchronisation wird mit einer Phase-Locked-Loop Schaltung in ECL-Technik realisiert. Diese verwendet als Referenzfrequenz die 1.3 GHz des Beschleunigers und regelt die Frequenz des Lasers durch Veränderung des optischen Weges mittels eines Piezokristalls. Die Elektronik muss also auf die langsamen Zeitkonstanten dieser mechanischen Komponenten optimiert werden und insbesondere deren langsame Schwingungen von 0 Hz bis zu einigen kHz kompensieren. Es wurde ein Phasenjitter von 0.2 ps erreicht. Da bei TTF nicht jede Periode des 1.3 GHz Beschleunigerfeldes mit Strahl gefüllt ist und auch der Laser nur mit 1/16 dieser Frequenz betrieben werden kann, erlaubt die Elektronik, über die weiteren Kontrollsignale von TTF den Laser neben der Phasenstabilität auch auf eine ausgewählte Periode zu synchronisieren.

Verschiedene Projekte

Das Alarmsystem für den Elektronenring von HERA befindet sich im Einsatz. Die Hardware wurde von FEB modifiziert, um die Gefahr einer vorzeitigen Alterung durch hohe Temperaturen zu vermeiden. Die Betriebserfahrung des BKR und zusätzlich angeschlossene Alarmquellen resultierten in erweiterten Anforderungen an die Software für das Kontroll- und Archivsystem, die entsprechend erweitert und angepasst wurde.

Die Firmware und Serversoftware der Transientenrekorder wurde von FEB weiterentwickelt. Zusätzliche Geräte wurden bei PETRA in Betrieb genommen. In der neuen Serie wurden einige Bauteile durch modernere Komponenten ersetzt. Eine entsprechende Modellpflege aller Hardwarekomponenten ist in Arbeit, um

auch weiterhin Erweiterungen und Ersatzteile fertigen zu können, die kompatibel zu bestehenden Geräten sind.

Die HERA Quenchüberwachung der supraleitenden Magnete löst bei Erkennung eines Fehlverhaltens die Stromabschaltung der Magnete und einen Strahldump von HERA aus, um die Beschleuniger- und Experimentekomponenten zu schützen. Nach der Luminositätssteigerung hatte sich gezeigt, dass in die Kommunikation der Quench-Alarmzentrale mit der überwachenden SPS unter bestimmten Umständen Störsignale einkoppeln, was zu Strahlabschaltungen geführt hat. Die Störsignale konnten ohne größere Hardware-Änderungen durch Modifikationen und Erweiterungen der Software des LATTICE-CPLD der Alarmzentrale herausgefiltert werden.

Die Gruppe FEA hat für HASYLAB ein recht aufwändiges Datenerfassungsmodul (RET02) entwickelt, mit dem Bilderdaten von einem HASYLAB-Detektor erfasst und zwischengespeichert werden. Die Daten können seriell von drei verschiedenen Datenquellen eingelesen werden. Zusätzlich zur Bilderfassung werden noch vier ADCs ausgelesen und deren Daten, synchronisiert mit den Bilderdaten, ebenfalls in einem Memory zwischengespeichert. Auf diese Informationen kann nach Beendigung der Bilderfassung über VMEBus zugegriffen werden.

Für das MWPC-Triggersystem des H1-Experiments hat FEA Aufsteckmodule mit Leitungstreibern und programmierbaren Delay-Bausteinen entwickelt. Diese werden als Ersatz für die bisherigen aufgesockelten Treiberbausteine in die vorhandenen Steckfassungen eingesetzt und erweitern so ohne Modifikation der Mutterplatine die Funktionalität des Triggersystems.

Für die Gruppe IT hat FEA ein Modul zur Überwachung der zentralen unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) entwickelt. Damit werden bei Stromausfall die Systemoperatoren alarmiert und die WindowsNT-Server rechtzeitig vor dem Ausfall der Stromversorgung heruntergefahren.

Bibliothek und Dokumentation

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

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

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

Die Zentralbibliothek in Hamburg und die Bibliothek von DESY Zeuthen informieren ihre Benutzer elektronisch im WWW. Die Zentralbibliothek informiert darüber hinaus über die Neuerwerbungen der Bibliotheken von DESY Hamburg in den gedruckten „Bibliotheksmittellungen“.

Die DESY-Zentralbibliothek ist anerkannte Ausbildungsstelle für Fachangestellte für Medien- und Informationsdienste der Fachrichtung Bibliothek und stellt Praktikumsplätze für Studenten des Bibliothekswesens zur Verfügung. Schülerinnen und Schüler des 10. und 11. Schuljahres werden in Betriebs- und Berufspraktika in die bibliothekarische Arbeitswelt eingewiesen. In der Teilgruppe „Dokumentation“ arbeiten Diplom-Physiker/innen seit 1992 im berufspraktischen Teil ihrer zweijährigen Ausbildung zu Wissenschaftlichen Dokumentaren.

Die Gruppe ist korporatives Mitglied in der Arbeitsgemeinschaft der Spezialbibliotheken (ASpB) im Deutschen Bibliotheksverband (DBV), im Arbeitskreis Bibliotheks- und Informationsmanagement der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF), in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) und in der Gesellschaft für Informatik (GI).

Bibliotheken

DESY hat neben der Zentralbibliothek eine Institutsbibliothek bei DESY Zeuthen, eine Bibliothek im Hamburger Synchrotronstrahlungs-Labor HASYLAB und eine Abteilungsbibliothek der Arbeitsgruppe MKS. Ungefähr 29 200 Bücher wurden Ende 2002 über den gemeinsamen OPAC (Online Public Access Catalogue) nachgewiesen.

Die Institutsbibliothek im HASYLAB sammelt im Wesentlichen Literatur zur Festkörperphysik. Der Bestand umfasst 1270 Bücher (ohne Zeitschriftenbände). Erwerbung und Katalogisierung werden von der Zentralbibliothek durchgeführt. Für die Benutzung gelten laborinterne Regelungen.

Die Bücherei der Abteilung MKS hat etwa 200 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 1600 Leser regelmäßig die Zentralbibliothek. Sie entliehen durchschnittlich 95

	Zugang	Löschungen	Bestand (31.12.2002)
Lehrbücher/Monographien	2188	423	30 709
Gebundene Zeitschriftenbände	1119	496	27 784
Laufend gehaltene Zeitschriften	16	12	411*
Zeitschriften (Verwaltung)	-	1	31**
elektronische Zeitschriften	132	47	1096

* zzgl. 20 Abonnements von Tages-/Wochenzeitungen
 ** davon 11 Abonnements von Zeitungen

Tabelle 4: *Entwicklung des Bibliotheksbestands im Jahr 2002.*

Medien (Bücher, Videos, CDs usw.) pro Woche. Im zunehmenden Leihverkehr wurden 525, im gebenden 254 Literaturbestellungen positiv bearbeitet. 703 Medien gingen ohne Inventarisierung als Verbrauchsmaterial direkt in die Abteilungen bzw. Gruppen.

Die Entwicklung des Bibliotheksbestands im Berichtszeitraum zeigt Tabelle 4.

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

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

Der HGF-Arbeitskreis Bibliotheks- und Informationsmanagement führte auch im Jahr 2002 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. Insgesamt konnte zum Ende des Jahres auf die Inhaltsverzeichnisse, Kurzfassungen und Volltexte der Veröffentlichungen in 1096 elektronischen Zeitschriften zugegriffen werden.

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

Bibliothek von DESY Zeuthen

Diese Bibliothek wird von 275 Lesern regelmäßig genutzt. Sie konnten sich Ende des Berichtsjahres aus 9082 Lehrbüchern und Monographien und 8303 Zeitschriftenbänden informieren. 88 Zeitschriftentitel sind abonniert. Im Jahr 2002 wurden 248 Literaturstellen im zunehmenden Leihverkehr besorgt, 123 davon von der Zentralbibliothek in Hamburg.

Eine Bibliothekarin arbeitete im Rahmen des vereinbarten Personalaustauschs 4 Wochen lang in der CERN-Bibliothek.

Berichts- und Veröffentlichungswesen

Im Jahr 2002 wurden 230 DESY-Berichte, 2 Habilitationen, 47 Dissertationen, 5 Diplomarbeiten und 4 Interne Berichte gedruckt und 2 Konferenzabhandlungen publiziert. 162 Veröffentlichungen erschienen in Fachzeitschriften unter Beachtung der DESY-Publikationsordnung. Die Übertragung der elektronisch lesbaren Versionen der DESY-Berichte in die e-Print-Archive arXiv.org wurde überwacht.

Im „Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron“ erschien der Ergänzungsband zum X-Ray-Laser des „TESLA Technical Design Report“.

Dokumentation

Die Teilgruppe „Dokumentation“ stellt die von den DESY-Mitarbeitern und den bei DESY tätigen Gästen benötigte Literatur- und Fakteninformation in elektronischer Form zur Verfügung. Sie pflegt das integrierte Bibliothekssystem ALEPH und die Web-Seiten der Zentralbibliothek. Bei der Umstellung von ALEPH auf die neue Version 14.2 unterstützte sie die Hersteller-Firma.

Literaturdatenbank HEP

Die Literaturdatenbank HEP wird gemeinsam mit der SLAC-Bibliothek, der weitere Fachbibliotheken weltweit zuarbeiten, erstellt.

Im Jahr 2002 hat die Teilgruppe Dokumentation für die Datenbank HEP 6287 Publikationen in Fachzeitschriften und Konferenzabhandlungen und 16 353 Forschungsberichte und Vorabdrucke klassifiziert und indiziert. Von weiteren 9098 Publikationen und 1716 Forschungsberichten wurden, um sie in der Datenbank schnell nachzuweisen, zunächst nur die bibliographischen Angaben erfasst. Für mehr als 9200 bereits dokumentierte Berichte wurden nach ihrer Veröffentlichung Publikationsvermerke hinzugefügt.

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

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

Bei der Katalogisierung von elektronisch verfügbaren Artikeln werden zunehmend die Daten der Verlage ausgewertet. Zur Zeit werden die Inhaltsver-

zeichnisse von 123 Zeitschriften und, soweit verfügbar, von Konferenz-Proceedings halbautomatisch recherchiert. Die bibliografischen Daten nicht vorhandener Artikel werden, so weit wie möglich automatisch, in die Datenbank übernommen, und es werden Links zu den Artikeln auf den Servern der Anbieter gesetzt. Viele Zeitschriftenartikel und Konferenzvorträge sind deshalb schon vor Erscheinen der gedruckten Version in der HEP-Datenbank nachgewiesen.

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

Informationsangebot

Der Zugriff auf die Literaturdatenbank HEP ist über das WWW möglich. Auf die DESY-residenten Daten wurde im Jahr 2002 mit 540 145 Recherchen zugegriffen.

Die Volltexte von 95 500 Vorabdrucken, Doktor- und Diplomarbeiten und Konferenzbeiträgen, die auf dem Preprint-Archiv der Bibliothek gespeichert sind – etwa 11 GByte Daten – können von verschiedenen Stellen der Web-Seiten der Bibliothek eingesehen werden. Einfache Zugriffsmöglichkeiten auf die Volltext-Archive der Maschinengruppen und des Linear-Collider Projektes werden angeboten.

Die Migration des Bibliotheks-Webservers und des Volltext-Archivs auf eine bibliothekseigene Maschine hat im Februar 2002 stattgefunden.

Über die Web-Seite der DESY-Bibliothek erhält man auch Zugang zum gemeinsamen 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 vermittelt weiterhin den Zugang zu den Datenbanken des Fachinformationszentrums Energie, Physik, Mathematik in Karlsruhe, zum Fachinformationszentrum Technik in Frankfurt und

zur Literaturdatenbank MathSciNet, die alle Publikationen zur Mathematik seit 1940 enthält. Hauptnutzer des FIZ Karlsruhe/STN waren Mitarbeiter am HASYLAB, des FIZ Frankfurt die Gruppe Konstruktion. Ab Oktober 2002 bestand Zugriff auf die Online-Ausgabe der Römpp-Lexika.

Ausbildung

Seit 1983 bildet die Zentralbibliothek zum Beruf „Fachangestellte/r für Medien- und Informationsdienste, Fachrichtung Bibliothek“ (bis 1998 Assistent/in an Bibliotheken) aus. Im Berichtsjahr beendeten Ende August zwei Auszubildende ihre Ausbildung, zwei nahmen sie Anfang September auf.

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

oder einem Verlag sowie bei einem Buchbinder absolviert.

Eine Ausbilderin ist Mitglied im gemeinsamen Prüfungsausschuss des Personalamts der Freien und Hansestadt und der Handelskammer Hamburg.

Bereits seit über 30 Jahren bildet die Bibliothek künftige Diplom-Bibliothekare in den von ihren Hochschulen vorgeschriebenen Praktika aus. Im Berichtsjahr wurde eine Diplomarbeit des Fachbereichs Bibliothek und Information der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg betreut.

Seit 1992 arbeiten Diplom-Physiker während ihrer berufsbegleitenden Ausbildung zu „Wissenschaftlichen Dokumentaren“ zwei Jahre lang als wissenschaftliche Mitarbeiter/innen in der DESY-Dokumentation. Ende 2002 schloss eine Physikerin diese Ausbildung ab.

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

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“, sorgt für den erforderlichen Informationsfluss, wobei sie stets mit der vollen Unterstützung aller DESY-Bereiche und -Gruppen rechnen kann, und schlägt regelmäßig Kommunikationsstrategien vor. Im Berichtsjahr stand insbesondere die Kommunikation des TESLA-Projekts im Vordergrund und forderte verstärkten Einsatz. Eine wichtige Rolle spielte die Information der Anlieger an der TESLA-Trasse im Kreis Pinneberg, wobei ein breites Spektrum abgedeckt werden musste – von den Anfragen einzelner Bürger bis hin zu Informationsveranstaltungen auf Gemeinde- oder Kreisebene. Internationale Beachtung fanden die Begutachtung des TESLA-Projekts durch den von der Bundesregierung beauftragten Wissenschaftsrat und die daraus resultierenden Empfehlungen, zu denen Presse- und Informationsmaterial erstellt wurde.

Neben solchen Schwerpunktprojekten bedeutet PR-Arbeit, ständig ein aktuelles und vielfältiges Spektrum an Informationsangeboten und Kommunikationsmaßnahmen zu pflegen. Dazu gehören die Herausgabe von Informationsschriften für einen breiten Leser- und Interessentenkreis sowie der weit gefächerte Kontakt zu den Medien. Deren Bedeutung im Tagesgeschäft ist gestiegen, weil zum einen das Medienangebot in allen Bereichen stetig zunimmt und zum anderen der Anteil der Wissenschaftsberichterstattung in den Medien ebenfalls angestiegen ist bei gleichzeitig zunehmender Fluktuation in den Redaktionen. Zur PR-Arbeit gehört auch, ständig für allgemeine, von außen an DESY heran getragene Anfragen ansprechbar zu sein sowie die bei DESY arbeitenden Menschen über Neues aus den verschiedenen Bereichen des Zentrums zu

informieren, ebenso die Präsentation des Instituts auf Messen und Ausstellungen.

Des Weiteren ist die regelmäßige Durchführung von Besichtigungen ein wesentlicher Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit. Im Jahr 2002 kamen etwa 9000 Besucherinnen und Besucher in 393 Einzelgruppen zu DESY, davon 221 Schülergruppen und 50 Studentengruppen. Wie die Besucherinnen und Besucher ihre DESY-Führung beurteilen, wurde bislang nicht systematisch ermittelt, sondern beschränkt sich auf Einzelmeinungen von Besuchern, die sich persönlich, per Brief oder E-Mail für eine Führung bedankten. Daher nimmt DESY an einem von der Europäischen Union geförderten zweijährigen Forschungsprojekt teil, das die Besucherprogramme großer Forschungseinrichtungen untersucht. Neben DESY sind dies das Forschungszentrum Jülich, CERN (Schweiz), INFN Gran Sasso (Italien) sowie Demokritos (Griechenland). Sozialwissenschaftler aus den beteiligten Ländern haben diese umfangreiche Studie erstellt und werten sie aus.

Im Berichtsjahr wurden zu diesem Projekt eine umfassende und systematische Besucherbefragung, begleitende Beobachtungen während der Besichtigung und explorative Interviews mit Besuchern bei DESY durchgeführt. Im Mittelpunkt standen Fragen wie: Welchen Nutzen haben die Besucher von den Besichtigungen? Sind die Informationen verständlich? Wie lassen sich Organisation und Inhalt der Besuche verbessern? Die Ergebnisse sollen künftigen Besuchern zugute kommen. Insgesamt 900 Besucherinnen und Besucher nahmen bei DESY an der umfangreichen Fragebogenaktion teil. Sozialwissenschaftler haben 40 explorative Interviews mit Besuchern geführt und sechs Besichtigungen begleitend beobachtet. Im Jahr 2003 werden Besucher, die einer Nachbefragung zugestimmt haben, nochmals telefonisch kontaktiert und zu ähnlichen inhaltlichen Themen wie denen der Fragebogenaktion

befragt. Im gleichen Jahr werden die erhobenen Daten aus allen fünf Forschungsinstituten intensiv ausgewertet und durch zusätzliche Untersuchungen ergänzt; die Ergebnisse sollen Ende 2003 veröffentlicht werden.

Die Medienauswertung belegt das große Interesse der Presse an TESLA und anderen DESY-Themen: Zu TESLA erschienen im Jahr 2002 insgesamt 208 Zeitungsbeiträge und 9 Fernsehbeiträge; zu anderen DESY-Themen gab es 83 Zeitungsbeiträge und 4 Fernsehbeiträge. (Die Radiosender konnten nicht ausgewertet werden). Einen wichtigen Schwerpunkt der Berichterstattung bildete das zehnjährige Bestehen von HERA. Bei der überregionalen und internationalen Pressearbeit haben sich die Internet-Presseseiten (www.desy.de/presse) als besonders wertvoll erwiesen. Sie werden laufend ergänzt und aktualisiert, enthalten unter anderem ausführliche Hintergrundinformationen zu allen DESY-Themen und zu TESLA sowie ein Fotoarchiv und existieren in deutscher und englischer Sprache.

Ein Schwerpunkt bei der Präsentation auf Messen und Ausstellungen ist die Information der Zielgruppe Lehrer/Schüler. Deshalb war DESY auch im Jahr 2002 auf der Hauptversammlung des Deutschen Vereins zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU) in Hannover mit einem Informationsstand vertreten. Vorgestellt wurden DESYs Angebote für Lehrer und Schüler, unter anderem die interaktive Lernsoftware „DESYs KworkQuark – Teilchenphysik für alle!“ sowie die Unterrichtsmaterialien zum TESLA-Röntgenlaser und zur TESLA-Teilchenphysik. Weiterhin präsentierte sich DESY mit einem großen Ausstellungsstand zum Thema TESLA wie jedes Jahr auf der Familienmesse „Du und Deine Welt“, die sich an ein breites Zielpublikum richtet. Zudem beteiligte sich DESY am Tag der Offenen Tür der Max-Planck-Gesellschaft in München, am INFN-Stand auf einer Verbraucherausstellung in Mailand sowie an einer Informationsveranstaltung des Komitees für Elementarteilchenphysik (KET) im Bonner Wissenschaftszentrum.

Des Weiteren wurden die Arbeiten an der TESLA-Wanderausstellung, die in allgemein verständlicher Form über TESLA informiert, im Berichtsjahr fortgeführt. Einen wichtigen Schwerpunkt bildete die Produktion der 38 Ausstellungstafeln und der anderen Informationsmaterialien in englischer Sprache.



Abbildung 79: Die neue HERA-Broschüre gibt es auf deutsch und englisch, in gedruckter Version und als pdf-Datei im Internet.

Neue HERA-Broschüre

Eine wichtige Ergänzung zu dem PR-Angebot an Informationsbroschüren und Faltblättern bildet die neue HERA-Broschüre, die im Berichtsjahr fertig gestellt wurde (Abb. 79). Sie umfasst über 90 Seiten, ist spannend und allgemein verständlich geschrieben, ansprechend gestaltet und mit vielen informativen Grafiken versehen; es gibt sie in einer deutschen und einer englischen Version. Die Broschüre gibt einen Einblick in zehn Jahre Teilchenphysik an HERA; sie beschreibt die Menschen, die Maschine, die Forschungserfolge und die Herausforderungen für die Zukunft. Vor allem auch Nicht-Physiker bekommen einen Einblick in die spannende Welt der Teilchenphysik. Die bunt bebilderten und sorgfältig gestalteten Seiten regen zum Blättern und Stöbern an, und die neuen

Grafiken vermitteln ein anschauliches Bild von den komplexen Geschehnissen in der HERA-Welt. Die Broschüre ist ebenso wie die HASYLAB- und die TESLA-Broschüre auch als pdf-Datei in deutscher und englischer Version im Internet verfügbar (www.desy.de/pr-info/desyhome/html/presse/pdf.html).

DESYs KworkQuark

„DESYs KworkQuark – Teilchenphysik für alle!“ ist hochwertige Lernsoftware und im Internet für alle frei verfügbar (<http://kworkquark.desy.de>). Das Programm wurde optisch und inhaltlich erweitert, mit neuen Diensten versehen und bietet nun eine mit Texten, Illustrationen und Simulationen versehene Wissenswelt zur Teilchenphysik, eine umfangreiche Linksammlung zur modernen Physik, ein Diskussionsforum, einen Nachrichtendienst mit aktuellen Meldungen aus der Teilchenphysik sowie einen speziellen Bereich für Lehrer, die Teilchenphysik im Unterricht behandeln wollen. Die Neuauflage von KworkQuark wurde von der Hamburger Multimedia-Agentur „Sand und Schiefer – büro für neues lernen“ in Zusammenarbeit mit der Abteilung Öffentlichkeitsarbeit von DESY konzipiert und produziert. Die Bilanz kann sich sehen lassen: Das Berliner Institut für Bildung in der Informationsgesellschaft der TU Berlin nominierte das Wissensportal für den Deutschen Bildungssoftwarepreis „digita 2002“. Knapp 4000 Zugriffe verzeichnet KworkQuark pro Monat; über 2000 Nutzer – darunter mehr als 300 Lehrer – ließen sich bisher registrieren, etwa 60 weitere melden sich pro Monat neu an. Über 1400 Interessierte lassen sich regelmäßig anhand des KworkQuark-Newsletters über Neuigkeiten aus der Welt der Teilchenphysik informieren. Dieser Erfolg motivierte DESY, zusammen mit „Sand und Schiefer“ ein Konzept für eine umfassende Erweiterung von KworkQuark zu erstellen, um es als „den“ deutschsprachigen Web-Einstieg in die Welt der Teilchenphysik zu etablieren.

TESLA-Kommunikation in der Nachbarschaft

Ein Schwerpunkt der TESLA-Kommunikation war die umfassende Information der Anlieger der sieben Versor-



Abbildung 80: *Gut besucht: Zu der Einwohnerversammlung zum Thema TESLA in Bockholt-Hanredder am 7. März 2002 kamen so viele interessierte Bürgerinnen und Bürger, dass die Veranstaltung kurzfristig in die Sporthalle verlegt wurde.*

ungsstandorte im Kreis Pinneberg entlang der geplanten 33 km langen TESLA-Trasse und des Forschungsgeländes in Ellerhoop über die konkreten Standortplanungen. Ziel war es, die von den Baumaßnahmen betroffenen Gemeinden und Anlieger noch vor Beginn des öffentlichen Planfeststellungsverfahrens, das im Jahr 2002 eingeleitet werden sollte, über das Verfahren, die zu erwartende Bautätigkeit sowie über die oberirdischen Bauwerke in Kenntnis zu setzen. Mitglieder der TESLA-Planungsgruppe und der PR-Abteilung führten Informationsveranstaltungen in den Gemeinden Halstenbek, Borstel-Hohenraden, Ellerhoop, Bevern, Bokholt-Hanredder, Brande-Hörnerkirchen und Westerhorn durch, wobei sie die Pläne mit den politischen Vertretern der jeweiligen Gemeinde diskutierten. In öffentlichen Versammlungen wurden die Einwohner dann über das TESLA-Projekt und die für sie zu erwartenden Auswirkungen informiert (Abb. 80). Im Anschluss daran fand jeweils mindestens eine Abendveranstaltung bei DESY statt, bei der die Einwohner einer Gemeinde die Gelegenheit hatten, die DESY-Anlagen zu besichtigen und sich über deren Betrieb durch eigene Anschauung genauestens zu informieren. Ein zweites wesentliches Element der Aufklärungsarbeit war der individuelle Kontakt zu den unmittelbar betroffenen Nachbarn, vor allem den Eigentümern von bebauten oder unbe-

bauten Grundstücken, die für TESLA benötigt werden. Eine besondere Situation herrscht in Ellerhoop, einer ländlichen Gemeinde mit etwa 1300 Einwohnern, in deren Außenbereich das etwa 70 Hektar große TESLA-Gelände geplant ist. Hier wird das TESLA-Projekt von den Gemeindevertretern schon in die Zukunftskonzeption für den Ort mit einbezogen. Um mögliche Synergieeffekte zum Beispiel bei der gemeinsamen Nutzung von Infrastruktur sehr früh berücksichtigen zu können, wurde ein „Runder Tisch“ eingeführt, an dem die Betreiber des benachbarten Arboretums sowie des geplanten Kompetenzzentrums Gartenbau und Vertreter von Ellerhoop mit den TESLA-Planern diskutieren.

Die Intensität der TESLA-Nachbarschaftsarbeit zeigt die Bilanz für das Berichtsjahr: Es wurden 20 Treffen mit Trägern öffentlicher Belange, Initiativen und Verbänden arrangiert. Auf sechs öffentlichen Einwohnerversammlungen haben DESY-Vertreter über die TESLA-Planungen berichtet. Alle Standortgemeinden sowie Interessenverbände des Kreises Pinneberg machten von der Möglichkeit Gebrauch, mit interessierten Einwohnern die DESY-Anlagen zu besichtigen – insgesamt sieben Abendtermine. Und in mehr als 120 Einzelgesprächen wurden die unmittelbar Betroffenen ausführlich über die sie betreffenden TESLA-Planungen informiert. Zur Handhabung und Dokumentation dieser Aktivitäten wurde eine Kontaktdatenbank eingerichtet, die im Hinblick auf künftige Grundstücksverhandlungen auch die Zuordnung von Grundflächen zu Eigentümern und Besitzern erlaubt.

Internationale PR-Aktivitäten zur Teilchenphysik

Basierend auf einer im Dezember 2001 von den Presereferenten von DESY, Fermilab, CERN/SLAC, Gran Sasso und BNL ins Leben gerufenen Initiative zur internationalen Zusammenarbeit bei der Kommunikation der Teilchenphysik etablierte sich im Berichtsjahr die „International Particle Physics Communication Group“. Dieser Kooperation sind bis Jahresende zwölf Teilchenphysikzentren aus Amerika, Asien und Europa beigetreten. Als erste gemeinsame Aktion wurde die Internet-Plattform www.interactions.org gegründet,

über die alle Pressemeldungen der Zentren verbreitet werden und auf der im kommenden Jahr ein Bildarchiv mit repräsentativen Fotos und Grafiken aller Zentren eingerichtet werden soll. Weitere Aktionen sowie regelmäßige Treffen zur Entwicklung von länderunabhängigen Kommunikationsstrategien für die Teilchenphysik sind geplant.

TESLA-Ausstellung in Berlin und Wissenschaftsforum

Fünf Wochen lang präsentierte DESY der Öffentlichkeit im Frühjahr 2002 im Automobil Forum Unter den Linden in Berlin das Zukunftsprojekt TESLA – mit großem Erfolg (Abb. 81). Über 22 000 Besucher zog die multimediale Ausstellung an, unter ihnen über 70 Schulklassen und 6000 Teilnehmer an der Langen Nacht der Museen. Berliner Passanten, Studierende, Touristen, Journalisten und Politiker nutzten die Gelegenheit, sich über DESY und TESLA zu informieren. Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen von DESY Zeuthen und verschiedene Hamburger Gruppen waren an der Konzeption und Durchführung der Ausstellung – inklusive Rahmenprogramm – beteiligt. Mit Hilfe von Modellen, Originalkomponenten, Ausstellungstafeln und Computeranimationen wurde den Besuchern „Physik zum Anfassen“ geboten und die verschiedenen Aspekte des TESLA-Projekts anschaulich und spannend vermittelt. Die zahlreichen Abendveranstaltungen waren ebenfalls gut besucht, so zum Beispiel das vom NDR und dem Hamburg Journal veranstaltete Wissenschafts-Forum zum Thema „TESLA – Der Leuchtturm in der internationalen Forschungslandschaft“, eine Diskussionsveranstaltung mit Experten, Politikern und interessierten Bürgern.

Schülerprojekte

„physik.begreifen@desy.de“ feierte im November 2002 sein fünfjähriges Bestehen, und die Bilanz von DESYs Schülerlabor kann sich sehen lassen: 440 Gruppen mit insgesamt 8700 Schülerinnen und Schülern nutzten in den vergangenen fünf Jahren das Angebot. Das anfangs kleine Team hat mittler-



Abbildung 81: Am 15. Januar eröffneten DESY und das Automobil Forum Unter den Linden in Berlin gemeinsam die Ausstellung „TESLA – Licht der Zukunft“, die zahlreiche Besucher anzog.

weile einen eigens eingerichteten, von der Schulbehörde finanzierten Pavillon und einen weiteren Laborraum im Anbau der Lehrlingsausbildung. Darin werden den Schülerinnen und Schülern inzwischen zwei verschiedene, jeweils eintägige Praktika zu den Themen „Vakuum“ und „Radioaktivität“ angeboten. Von der Helmholtz-Gemeinschaft im Berichtsjahr bewilligte Fördermittel ermöglichen es, das Angebot von DESYs Schülerprojekt auch künftig weiter auszubauen; insbesondere soll das Angebot auf die Schülerstufen 11, 12 und 13 ausgedehnt sowie eine ähnliche Einrichtung für den DESY-Standort in Zeuthen konzipiert werden. Zudem waren die Praktikumstage physik.begreifen im September 2002 zu Gast im Kulturhistorischen Museum in Magdeburg.

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 ehemaligen Physiklehrers dargeboten und diskutiert (www.desy.de/faszination.physik/).

Im April beteiligte sich DESY zum zweiten Mal an dem bundesweiten „Girls' Day“. Unter dem Motto „nehmt Töchter mit zur Arbeit“ soll Mädchen die Gelegenheit gegeben werden, in verschiedene, auch „Frauentypische“ Berufe hinein zu schnuppern. Bei DESY nahmen insgesamt 66 Mädchen an dem von der Frauenvertretung organisierten Töchtertage teil.

Öffentlichkeitsarbeit in Zeuthen

Am Jahresanfang 2002 bildete die Betreuung der großen TESLA-Ausstellung in Berlin den Schwerpunkt der PR-Aktivitäten in Zeuthen. Ende Januar stand zudem ein Festkolloquium anlässlich des zehnjährigen Bestehens von DESY Zeuthen auf dem Programm. Weiterhin organisierte DESY Zeuthen im Berichtsjahr insgesamt 18 Institutsbesichtigungen für Schulklassen, Studenten und interessierte Bürger sowie sechs Weiterbildungsveranstaltungen für Physiklehrer und beteiligte sich am Tag der Wissenschaft des Landes Brandenburg, an der internationalen Luftfahrtausstellung im Rahmen des Landkreises Dahme-Spreewald sowie am Tag der Wirtschaft und Wissenschaft im Humboldt-Gymnasium Eichwalde.

Web-Office

Die Web-Angebote bei DESY sollen besser werden. Dazu soll das zunächst für fünf Jahre etablierte Projekt „Web-Office“ bei DESY beitragen. Nach einer Sondierungsphase haben die beteiligten Gruppen IT und PR im Jahr 2002 das Web-Office eingerichtet und perso-

nell besetzt. Es besteht aus einem Web-Koordinator (IT) einem Web-Konzeptionisten (IT), einer Web-Entwicklerin (IT) und einer Online-Redakteurin (PR, ab 1.1.2003) sowie einer halben Grafikerstelle (PR). Mit der Einrichtung des Web-Office soll ein struktureller Überbau für die DESY-Webseiten geschaffen werden. Eine wichtige Aufgabe ist die Pflege der zentralen Seiten, zu denen auch ein umfassender und aktueller Nachrichtendienst für die interne und externe Kommunikation gehört. In enger Abstimmung mit den DESY-Gruppen sollen neue Webkonzepte und -dienste entwickelt und Hilfe bei der Erstellung von Webseiten angeboten werden. Das von einer Medienagentur ausgearbeitete Konzept für einen verbesserten Web-Auftritt wurde im Berichtsjahr durch Befragung relevanter Gruppen der Web-Nutzer bei DESY noch ergänzt. Es zeigte sich, dass ein Redaktionssystem (Content-Management-System, CMS) eine wichtige Grundvoraussetzung für die künftige Arbeit des Web-Office ist. Nach intensiver Recherche und begleitenden Diskussionen mit den Web-Nutzern entschied sich das Web-Office Ende 2002 für ein in Frage kommendes System. Als nächster Schritt werden zunächst Testseiten mit dem neuen System programmiert, um seine Funktionalität zu prüfen. Erst dann kann das neue System DESY-weit eingeführt werden.