

Abbildung 86: Der Messzylinder des „Beam Trajectory Monitors“. Die eingangsseitige Blendenebene ist in der Vergrößerung unten rechts gezeigt, die rückwärtige Elektronikplatine mit den Detektoren ist in der linken Bildhälfte sichtbar. Der Abstand der Blenden- und Detektorebene beträgt 500 mm, die Neigung der Ebenen ist geringer als 0.03 mm.

Forschungsthemen DESY Zeuthen

Experimente bei HERA

Das H1-Experiment

Test der Quantenchromodynamik

Im Jahre 2000 wurde unter maßgeblicher Beteiligung der Zeuthener H1-Gruppe die erste Präzisionsmessung des inklusiven Elektron-Proton Streuquerschnitts bei HERA im Bereich tiefunelastischer Streuung publiziert. Aus dieser Messung wurden Daten für die Strukturfunktion F_2 und für die longitudinale Strukturfunktion F_L abgeleitet.

Die Abhängigkeit des Streuquerschnitts vom Impulsübertrag Q^2 ist in Übereinstimmung mit den Erwartungen der Quantenchromodynamik (QCD) und erlaubt daher, die Gluondichte bei kleinen Bjorken- x zu bestimmen. Dieses Resultat ist wichtig für die feldtheoretische Beschreibung der starken Wechselwirkung bei kleinen x und für Vorhersagen der Reaktionsquerschnitte bei zukünftigen Beschleunigern sowie von Wechselwirkungen höchstenergetischer, kosmischer Neutrinos.

Durch eine Kombination der Resultate mit Daten des Myon-Streuxperiments BCDMS am CERN, die bei größeren x -Werten gemessen wurden, konnte die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung mit einer Präzision von 1% bestimmt werden. Damit wurde bei HERA eine mit Messungen in anderen physikalischen Prozessen vergleichbare Genauigkeit erreicht. Die jetzt vorliegenden Messungen stellen eine Verbesserung um einen Faktor 2–3 gegenüber den bisherigen H1-Resultaten dar (Abb. 87). Das ist auch dem Ersatz und der Verbesserung der Detektorkomponenten im Rückwärtsbereich zu verdanken.

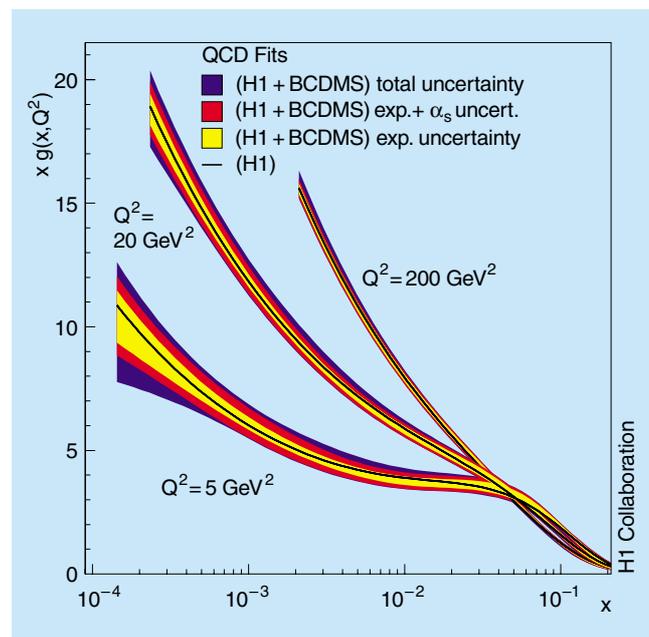


Abbildung 87: Die Gluon-Verteilungsfunktion als Resultat eines QCD-Fits an tiefunelastische inklusive Wirkungsquerschnitte der Experimente H1 und BCDMS. Die inneren Fehlerbänder geben den experimentellen Fehler für festes $\alpha_s(M_Z) = 0.1150$ an. Die mittleren Fehlerbänder schließen den Beitrag aufgrund des gleichzeitigen Fits von α_s ein. Die äußeren Fehlerbänder beinhalten auch die Ungewissheiten der QCD und der Fitprozedur.

Die Silizium-Detektoren BST und FST

Seit einigen Jahren wird der Silizium-Spurdetektor BST (Backward Silicon Tracker) bei der Datennahme erfolgreich eingesetzt. Während der Betriebsunterbrechung von HERA wird ein entsprechender Detektor, der FST (Forward Silicon Tracker), in Vorwärtsrichtung installiert (Abb. 88).

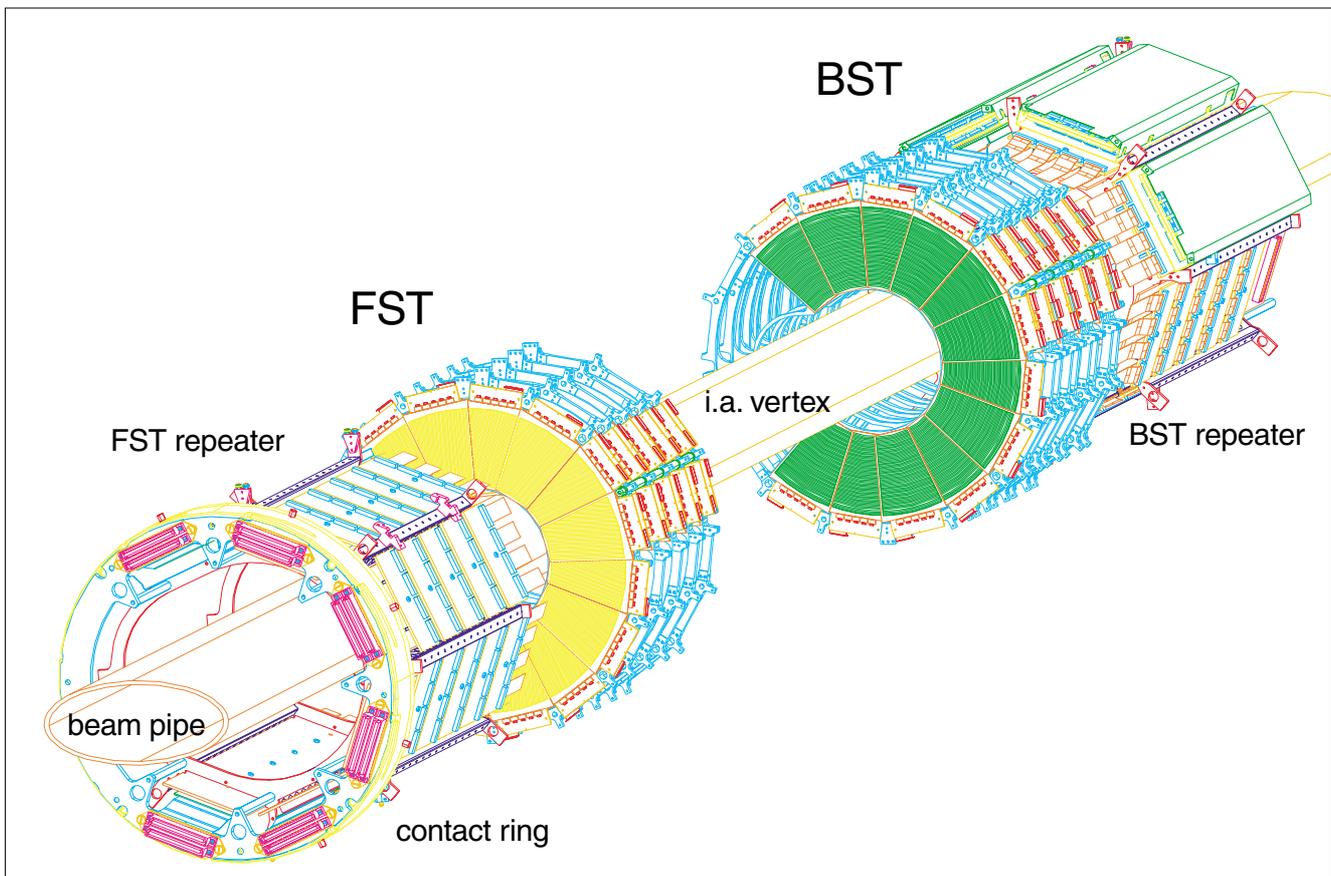


Abbildung 88: 3 D Ansicht der Silizium-Detektoren BST und FST.

Der BST dient zur Vertexrekonstruktion, zur Validisierung von Ereignissen sowie zur Messung des Streuwinkels. Im Jahr 2000 wurde der BST mit vier weiteren Detektorebenen und hoher Effizienz im H1-Experiment betrieben. So wurde der BST auch bei der Aufzeichnung von Daten mit verschobenem Vertex eingesetzt, die es gestatten, noch größere Streuwinkel und damit kleinere Impulsüberträge zu erreichen.

Zur Vorbereitung des BST auf die Luminositätserhöhung von HERA wurde ein neuer, hochintegrierter Schaltkreis (PRO) zur Auslese und Verstärkung der Silizium-Paddetektorsignale entwickelt, am Teststrahl untersucht und erfolgreich in Serie produziert. Die BST Mechanik musste der elliptischen Form des neuen Strahlrohres angepasst werden.

Der „Forward Silicon Tracker“ FST wird mit sogenannten u-v Modulen ausgerüstet, deren Entwicklung

im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. Für den FST und BST wurde ein einheitliches Repeaterkonzept in Zusammenarbeit mit dem Prager Akademieinstitut entworfen und in die Serienproduktion eingeführt. Die schwierige Aufgabe, den FST über eine Entfernung von etwa 2 m tief innerhalb des H1-Detektors elektrisch und mechanisch zu koppeln, wurde durch die Entwicklung eines speziellen Kontakttrings gelöst. Ausgehend von Simulationsrechnungen für die Erzeugung von Jets im FST wurde das Detektorkonzept optimiert und die Rekonstruktionssoftware entwickelt.

Vorwärts-Protonspektrometer FPS

Das FPS besteht aus vier Stationen, die sich 64–90 m vom Zentrum des H1-Experiments entfernt befinden. Diese Stationen, deren Detektoren aus szintillierenden

Fasern bestehen, dienen dem Nachweis von Protonen, die in den Elektron-Proton Kollisionen unter kleinen Winkeln relativ zum Protonenstrahl emittiert werden. Das FPS arbeitete im Jahre 2000 kontinuierlich und konnte die bislang größte Datenmenge aufzeichnen: 22 pb^{-1} in den vertikalen, 15 pb^{-1} in den horizontalen Stationen. Damit wurden etwa doppelt soviel Daten wie 1999 gesammelt. Diese Daten sind die Grundlage für Untersuchungen der ρ -Meson-Erzeugung, der tiefunelastischen Streuung und der Photoproduktion in Wechselwirkungen mit einem unter kleinem Winkel gestreuten Proton.

Im Dezember 1999 wurde im Rahmen des vorgesehenen Baugruppenaustauschs ein Detektor-Prototyp in einer vertikalen Station montiert. Dieser Prototyp wurde im Jahr 2000 erfolgreich getestet, so dass bis zum Sommer 2001 der Baugruppenaustausch für drei weitere Stationen vorgenommen wird. Das Ziel dieses Umbaus ist, die Langzeitverfügbarkeit der Detektoren bis zum Ende der H1-Datennahme zu erreichen und die Korrelation zwischen Detektorauflösung und -effektivität zu verringern.

Das Experiment HERA-B

Im Berichtsjahr wurde der HERA-B Detektor vervollständigt und in Betrieb genommen. Zwischen April und August 2000 wurden etwa 30 Millionen unelastische Proton-Kern Wechselwirkungen unter verschiedenen Triggerbedingungen aufgezeichnet. Die Analyse dieser Daten ist noch nicht abgeschlossen. Detektortechnologie und komplexe Trigger-Elektronik stellten dabei eine enorme Herausforderung dar, der die Kollaboration durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit begegnete. Diese Detektorentwicklungen sind wegbereitend für die nächste Generation von Hochratenexperimenten, sie verzögerten aber auch das Gesamtprojekt.

Die jetzt erreichte Leistungsfähigkeit und die Tatsache, dass die in Japan und den USA aufgebauten neuen B-Fabriken inzwischen sehr gut arbeiten und routinemäßig Daten nehmen, führten dazu, dass das HERA-B Experiment seine Konkurrenzfähigkeit auf dem Gebiet der B-Physik eingeübt hat. Gegenwärtig erfolgt die Ausarbeitung eines Physikprogramms, das mit dem existierenden Detektor durchgeführt werden kann. Mit

einer Verbesserung des Triggersystems ist ein Beitrag zur B-Physik zu einem späteren Zeitpunkt möglich.

Die an HERA-B beteiligte Gruppe von DESY Zeuthen hat in enger Zusammenarbeit mit der Humboldt-Universität zu Berlin Aufgaben und koordinierende Funktionen in folgenden Bereichen übernommen:

- Entwicklung, Bau und Betrieb des Spurkammersystems „Outer Tracker“ (in Kollaboration mit DESY-Hamburg, VIK Dubna, NIKHEF Amsterdam, Tsinghua Universität und IHEP Beijing),
- Aufbau und Betrieb einer Prozessorfarm zur schnellen Rekonstruktion und Filterung von Ereignissen im Echtzeitbetrieb,
- Beiträge zur Entwicklung des Physikprogramms,
- Software-Entwicklung:
 - Alignment und Kalibration des „Outer Tracker“,
 - Analyse physikalischer Prozesse mit Daten und Simulationen.

Äußerer Spurkammerdetektor

Im Folgenden werden die Zeuthen/Berlin-Aktivitäten im Rahmen des äußeren Spurkammersystems dargestellt. Eine vollständigere Beschreibung findet sich im Kapitel HERA-B (Seite 86).

Die Installation aller 13 Superlagen des äußeren Spurkammerdetektors wurde im Januar 2000 abgeschlossen. Die Zeuthen/Berlin-Arbeitsgruppe war für die Koordination der Arbeiten für die Auslese der etwa 115 000 Kanäle und für die Einbindung des Detektors in das zentrale Kontroll- und Datenauslesesystem von HERA-B zuständig. Während der Datennahme wurde die Gasverstärkung des Detektors durch spezielle, in Zeuthen gefertigte Monitorkammern kontrolliert.

Für das äußere Spurkammersystem ist in den vorhergehenden Jahren die Strahlenbelastbarkeit getestet worden, was zu der endgültigen Wahl des Kammermaterials und des Driftgases geführt hat. Die wesentlichen Messungen dazu sind an einem α -Strahl in Karlsruhe durchgeführt worden. Weitere systematische Studien wurden an Röntgen-Quellen in Zeuthen und Hamburg fortgeführt. In Zeuthen wird im Rahmen einer Doktorarbeit die Abhängigkeit möglicher Strahlenschäden

von verschiedenen Betriebsparametern wie Gasfluss, Bestrahlungsdichte und Wassergehalt untersucht.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Qualität der Daten der äußeren Spurkammern wurde die Hit-Effektivität in Abhängigkeit verschiedener Parameter, wie der Gasverstärkung der Driftzellen und der Schwellenspannung der Ausleseelektronik zur Unterdrückung von elektronischem Rauschen, abgeschätzt. Die Ergebnisse zeigen, dass Hit-Effektivitäten um 95% erreichbar sind, wenn die elektronische Abschirmung verbessert wird und wenn der Detektor bei optimaler Gasverstärkung betrieben werden kann. An beiden Problemen wird während der HERA-Umbauphase gearbeitet. Untersuchungen zeigten, dass die Genauigkeit der Drahtpositionierung innerhalb der Detektormodule besser als 100 μm ist, was dem geforderten Designwert entspricht. Damit ergab sich für die interne Auflösung der Driftzellen ein Wert um 350 μm . Auch hier lassen sich durch Reduzierung der Schwellenspannung Verbesserungen erreichen.

Prozessorfarm

Das Trigger- und Datenerfassungssystem des HERA-B Experiments enthält in der vierten Stufe eine Linux-PC-Farm zur Ereignisrekonstruktion im Echtzeitbetrieb. Damit stehen rekonstruierte Ereignisse unmittelbar nach der Datenspeicherung für weitergehende Physikanalysen zur Verfügung. Die Farm besteht aus 100 PCs mit je zwei Intel Pentium-III/500 MHz Prozessoren, die in ein Fast-Ethernet Netzwerk integriert sind. Der Aufbau der Farm wurde Ende 1999 abgeschlossen, und sie wurde in der Datennahmepériode 2000 erfolgreich in Betrieb genommen.

Seit Beendigung der Datennahme im September wird die Farm zum Reprozessieren der aufgezeichneten Ereignisse verwendet. Insgesamt wurden im Jahr 2000 etwa 30 Millionen Ereignisse gespeichert. Die gesamte Datenmenge beträgt fast 10 TB, die auf Bändern archiviert sind. Das Rekonstruktionsprogramm benötigt in der gegenwärtigen Variante 4,5 s für ein Ereignis eines getriggerten Runs mit 5 MHz Wechselwirkungsrate. Damit kann die Farm die geplante Ereignisrate von 50 Hz bewältigen. Die große Datenmenge bei HERA-B stellt hohe Anforderungen an das Datenmanagement, um einen Zugriff innerhalb vernünftiger Zeiten zu gewährleisten. Für die Analysen müssen die Ereignisse

in geeigneter Form auf Festplatten gespeichert werden. Hierzu werden spezielle Datensätze mit reduzierter Information erstellt und auch spezielle Ereignisklassen selektiert.

Software

HERA-B verfügt über ein leistungsfähiges Simulationsprogramm, das auf den LUND-Generatoren zur Erzeugung physikalischer Prozesse und auf dem Programm GEANT3 zur Detektorsimulation basiert. Es wurde im Wesentlichen im DESY Zeuthen entwickelt, gewartet und aktualisiert.

Der Vergleich der Simulation mit reellen Daten ergibt Übereinstimmungen in charakteristischen Verteilungen wie Besetzungsdichten oder Energieverteilungen, die in den meisten Fällen besser als 20% sind. Die im Jahr 2000 genommenen Daten werden gegenwärtig dazu genutzt, die Simulationsparameter zu verbessern.

Während in der Vergangenheit Simulationsstudien zur Detektoroptimierung eine große Rolle spielten, stehen gegenwärtig die Optimierung der Rekonstruktionssoftware und die Analyse der physikalischen Prozesse im Mittelpunkt der Arbeiten.

Die Produktion simulierter Daten, die für die Analyse verschiedener Prozesse benötigt wurden, wurde von der Zeuthen/Berlin-Gruppe für HERA-B koordiniert und zu einem signifikanten Teil durchgeführt.

Im Rahmen von zwei Doktorarbeiten wurden Studien zu einer geplanten, bisher aber nicht genutzten dritten Triggerstufe durchgeführt. Diese Triggerstufe ist ein reines Softwaresystem, das auf der PC-Farm der zweiten Triggerstufe laufen soll. Für die von der zweiten Triggerstufe selektierten Ereignisse werden alle Daten in die PC-Farm eingelesen, so dass auf dieser Stufe das erste Mal auf die gesamten Daten aller Subsysteme des Detektors zurückgegriffen werden kann.

Der vorgeschlagene Triggeralgorithmus benutzt die Daten des Vertexdetektors. Es konnte gezeigt werden, dass eine Spurrekonstruktion in diesem Detektor innerhalb von nur 100 ms pro Ereignis möglich ist. Anhand von Simulationen konnten geeignete Algorithmen entwickelt werden, die Ereignisse mit Sekundärvertices mit gutem Signal-zu-Untergrund-Verhältnis selektieren.

tieren. Die Entwicklung einer dritten Triggerstufe hat mit dem modifizierten Physikprogramm an Bedeutung gewonnen.

Analyse

Die Arbeitsgruppe hat sich sowohl an der Entwicklung des physikalischen Programms des Experiments durch Simulationsstudien als auch an der Analyse der ersten Daten beteiligt. Die Ausarbeitung eines modifizierten Physikprogramms ist von einem Mitglied der Zeuthen/Berlin-Gruppe koordiniert worden. Im Rahmen von Doktorarbeiten wurden Daten, die bereits in der Phase der Inbetriebnahme genommen wurden, analysiert. Neben Beiträgen zur Analyse von Ereignissen mit J/ψ -Zerfällen ist auch die quantitative Analyse der Erzeugung von π^0 -Mesonen mit hohem Transversalimpuls zu nennen.

Das HERMES Experiment

Die Zeuthener Gruppe wurde im Verlauf des Berichtsjahres personell verstärkt und ist sowohl an der Physikanalyse als auch am Betrieb des Experimentes maßgeblich beteiligt.

So stellt die Gruppe gegenwärtig den stellvertretenden Sprecher, der Technische Koordinator des Experimentes ist seit September 2000 Mitglied der Zeuthener Gruppe.

Die kontinuierliche Betreuung verschiedener Hardware-Komponenten – Driftkammer einschließlich Gas-system, Photon-Detektoren des RICH Detektors, Tuning-Szintillatoren – beansprucht einen beträchtlichen ständigen personellen Aufwand.

Beiträge zur Physikanalyse

Erste Ergebnisse zur polarisierten Strukturfunktion g_1^p wurden von der HERMES-Kollaboration für den kinematischen Bereich $0.0212 < x < 0.85$ und $Q^2 > 0.8 \text{ GeV}^2$ bereits früher veröffentlicht (siehe Jahresbericht 1999). Als Resultat einer neuen Analyse hat die

Zeuthener Gruppe in diesem Jahr g_1^p -Daten für den Bereich $0.0021 < x < 0.0212$ und $0.1 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 0.8 \text{ GeV}^2$ präsentiert, die auch auf mehreren Konferenzen vorgestellt wurden.

Es wurden umfangreiche systematische Untersuchungen durchgeführt, um die Daten bei kleinen Impulsen des gestreuten Positrons zu verstehen. Die systematischen Unsicherheiten der Daten bei kleinen x -Werten liegen unter 14%. Die HERMES-Daten stimmen gut mit den von der SMC-Collaboration publizierten Werten bei kleinem x überein, bei geringeren statistischen Unsicherheiten (Abb. 89). Die Daten des SMC- und HERMES-Experiments eröffnen neue Möglichkeiten für die Überprüfung des Geltungsbereichs der perturbativen QCD im Spinsektor.

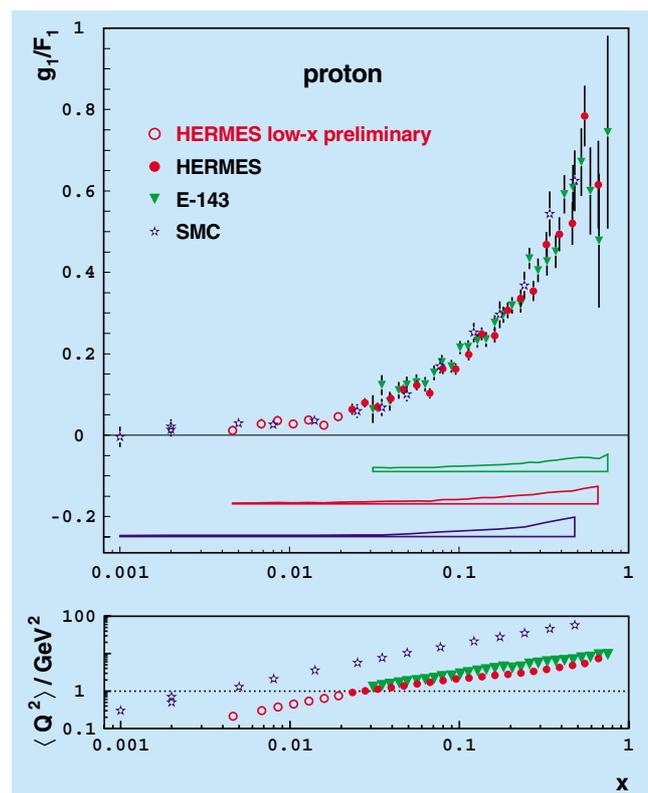


Abbildung 89: Das Verhältnis der polarisierten und unpolarisierten Strukturfunktionen als Funktion von x gemittelt über Q^2 . Die Fehlerbalken entsprechen den statistischen Fehlern. Die Fehlerbänder repräsentieren die experimentenspezifischen systematischen Fehler. In der unteren Abbildung sind die gemittelten Q^2 -Werte aufgetragen.

Die Arbeiten an der Software für den RICH-Detektor wurden im Laufe des Berichtsjahres erfolgreich abgeschlossen. Die Zeuthener Gruppe leistete hierzu einen großen Beitrag und hat diese Aktivitäten auch koordiniert.

Die Daten des RICH-Detektors werden mittels zweier verschiedener Methoden rekonstruiert: Indirektes „Ray Tracing“ (IRT) und Direktes „Ray Tracing“ (DRT). Für unterschiedliche Impulsbereiche und Spuranzahlen pro Ereignis liefern beide Methoden unterschiedlich gute Ergebnisse. Im allgemeinen ist zum Beispiel die IRT-Methode bei höheren Impulsen zu bevorzugen, die DRT-Methode demgegenüber bei niedrigeren Impulsen und komplizierteren Ereignissen. Zur Optimierung der RICH-Teilchenidentifizierung („Particle Identification“ PID) wurde daher der sogenannte RICH-PID-Scheduler (RPS) entwickelt, der, ausgehend vom Impuls des Teilchens und vom Typ des Ereignisses, die beste Methode oder eine Kombination beider Methoden auswählt. Der PID-Scheduler ergibt über den gesamten HERMES-Impulsbereich (2–18 GeV) die besten Resultate.

Das ZEUS-Experiment

Im Jahr 2000 haben die Mitglieder der Zeuthener Gruppe an zwei physikalischen Analysen und an methodischen Fragen gearbeitet. Der Zeuthener Beitrag zum Mikro-Vertex-Detektor (MVD) des ZEUS-Experiments, einer zentralen ZEUS-Komponente nach dem HERA Luminositäts-Upgrade, wurde fertig gestellt. Die Qualitätskontrolle wurde durchgeführt und die Daten in eine selbstentwickelte Datenbank aufgenommen. Mit der Inbetriebnahme dieses Detektors wird die Vertexmessung entscheidend verbessert und die Rekonstruktion von Teilchenzerfällen im Detail ermöglicht.

Ein Mitglied der Gruppe war vom Sommer 1998 bis zum Jahresende „Physics Chairman“ des ZEUS Experiments.

Informationen zur Daten-Qualität und Luminosität der Datennahme wurden gesammelt und im World Wide Web der Kollaboration zur Verfügung gestellt.

Ergebnisse der Querschnittsmessungen mit den Daten der Jahre 1998 bis 2000 wurden auf mehreren Konferen-

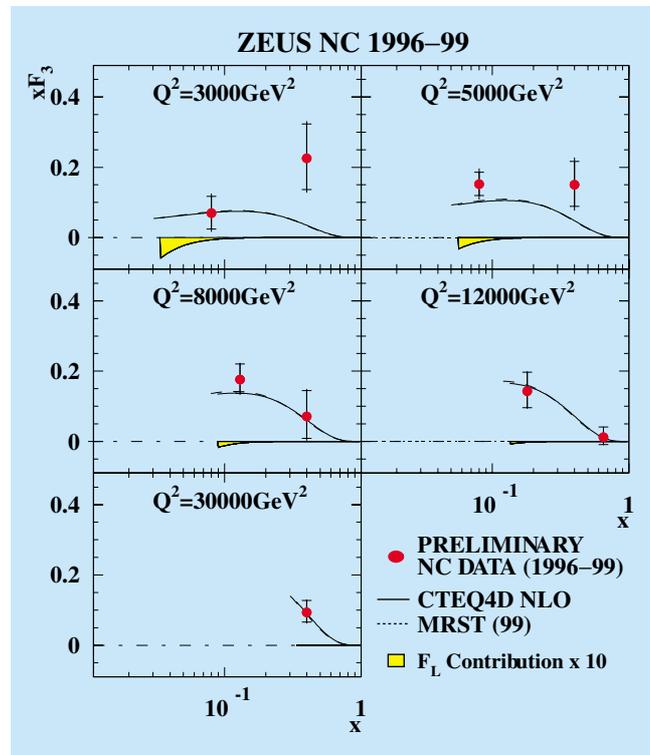


Abbildung 90: Die Strukturfunktion xF_3 , gemessen vom ZEUS-Experiment.

zen präsentiert. Ein wichtiges Resultat dieser Analyse war die erste Extraktion der Strukturfunktion xF_3 bei HERA (Abb. 90) und bei Experimenten mit geladenen Leptonen.

Die Methoden zur Rekonstruktion des Energieverlustes von Teilchen im inaktiven Material mit dem von der Gruppe betreuten Presampler-Detektor wurden verbessert. Die neuen Korrekturen, abgeleitet aus den tiefinelastischen Streudaten der Jahre 1996 bis 2000, wurden bei der Analyse der Daten mit neutralem Stromaustausch bei hohen Impulsüberträgen angewandt.

Ein Mitglied der Gruppe wurde zum Koordinator einer der fünf Physik-Gruppen des ZEUS-Experimentes berufen. Diese arbeitete am besseren Verständnis der Reaktion des Kalorimeters auf hochenergetische Elektronen und beteiligte sich an der Suche nach supersymmetrischen Teilchen in den ZEUS Daten. Zwischenergebnisse dieser Untersuchung wurden auf mehreren internationalen Konferenzen vorgestellt.

Das L3-Experiment am CERN

L3 ist eines der vier Experimente am Speicherring LEP im CERN. 12 Jahre lang registrierte der L3-Detektor Teilchen, die bei der Annihilation von Elektronen und Positronen entstehen. Seit dem Jahr 1995 wurde die Strahlenergie schrittweise erhöht. Hierzu erfolgte der Einbau supraleitender Kavitäten, die höhere Beschleunigungsgradienten ermöglichten. Im Jahr 2000 gelang es, pro Experiment eine Luminosität von etwa 230 pb^{-1} bei Schwerpunktenenergien zwischen 204 GeV und 208 GeV zur Verfügung zu stellen. Kurzzeitig wurden sogar Energien bis 209 GeV erreicht. Dies war und bleibt der LEP-Rekord, denn am 3. November 2000 wurden der Beschleuniger und die vier LEP-Experimente planmäßig abgeschaltet, um die Errichtung des Large Hadron Colliders (LHC) termingerecht zu ermöglichen. Damit ging die experimentelle Phase von LEP zu Ende. Die Auswertung der bis zum November 2000 aufgezeichneten Daten erfolgt zur Zeit.

Die Phasen der LEP-Physik lassen sich zeitlich und thematisch gut einordnen: 1989–1995 waren die Jahre der Physik auf der Z-Resonanz, in denen die Parameter des neutralen Eichbosons Z^0 untersucht wurden. Die Daten der folgenden Jahre erlaubten die Bestimmung der Eigenschaften der geladenen Eichbosonen W^\pm . Gleichzeitig wurde nach neuen Teilchen gesucht: An erster Stelle stand das Higgs-Boson, das im Standard-Modell vorhergesagt wird, um den Teilchen ihre Masse zu geben. Weiterhin wurde der Suche nach supersymmetrischen Teilchen breiter Raum gewidmet, weil theoretische Argumente sehr für die Existenz solcher Teilchen mit relativ kleinen Massen sprechen.

Die Messungen vor allem auf der Z-Resonanz liefern zwingende Hinweise, dass das Higgs-Boson im Standard-Modell eine Masse von $88^{+60}_{-37} \text{ GeV}$ hat. Die Masse des Higgs-Bosons ist mit 95% C.L. kleiner als 206 GeV. Damit wurde das Jahr 2000 zum Jahr der Higgs-Suche bei LEP.

Die Suche nach dem Higgs-Boson

Der dominante Prozess zur Erzeugung von Higgs-Bosonen im Energiebereich von LEP ist die so genannte Higgs-Strahlung, $e^+e^- \rightarrow ZH$. Z- und Higgs-Bosonen zerfallen jeweils in zwei Fermionen; gesucht

wurde nach Spuren aller möglichen Zerfallsarten der Z- und Higgs-Bosonen. Die Zeuthener Arbeitsgruppe konzentrierte sich auf Analysen der Zerfälle des Z in geladene Leptonen und Quarks. Da die Kopplungen des Higgs-Bosons mit der Masse wachsen, sind Zerfälle in schwere Teilchen bevorzugt. Für Higgs-Massen um 100 GeV sind das die b-Quarks, welche in B-Mesonen mit großer Lebensdauer fragmentieren. Die experimentelle Signatur sind somit entweder vier Jets oder ein Paar gleichartiger Leptonen plus zwei Jets, wobei in den Jets geschaut wird, ob es sekundäre Vertices von Zerfällen

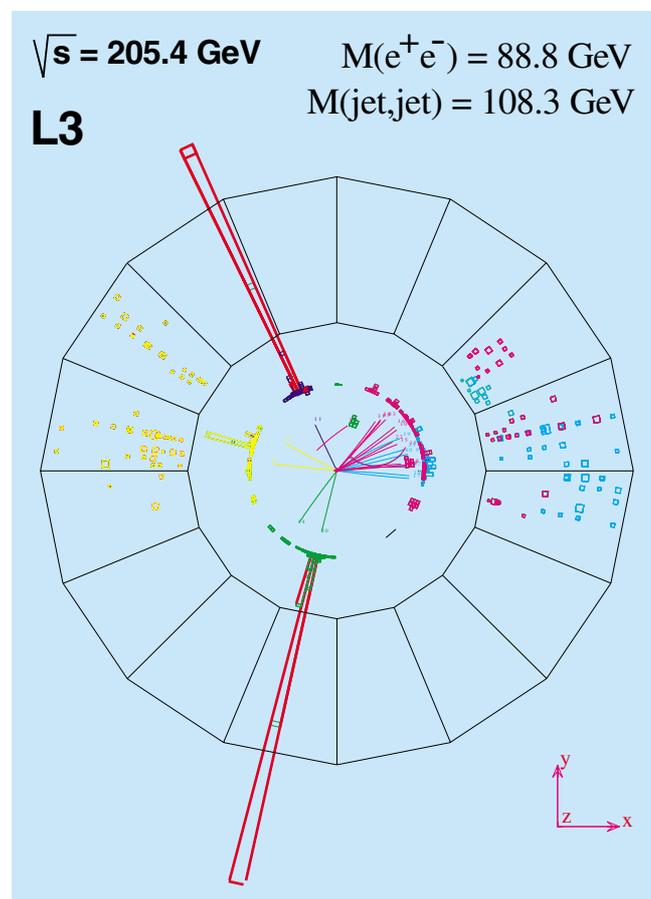


Abbildung 91: Ein Ereignis im L3-Detektor bei einer Energie von 206 GeV, in dem möglicherweise die Erzeugung eines Higgs-Bosons beobachtet wurde. Im Spurdetektor sind zwei entgegengesetzt geladene Spuren zu erkennen, die zu Schauern im elektromagnetischen Kalorimeter zeigen und damit als Elektronen erkannt wurden. Zwei Spurbündel zeigen in Richtung von Energie-depositionen im Hadronkalorimeter (Quark-Jets).

der langlebigen B-Mesonen gibt. In Abbildung 91 ist ein mögliches Higgs-Ereignis gezeigt, in dessen Endzustand ein Elektron-Positron Paar und zwei Quark Jets ($b\bar{b}$) beobachtet werden.

Die Masse der Jets, welche dem Higgs-Boson zugeordnet werden, ist 108 GeV. Weitere Kandidaten mit Dijet-Massen größer als 110 GeV wurden im 4-Jet-Kanal gefunden. Deren Zahl liegt etwas oberhalb der Erwartung aus dem Untergrund von anderen Prozessen wie $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ und $e^+e^- \rightarrow ZZ$, welche zu ähnlichen Endzuständen führen.

Auch die anderen LEP-Experimente beobachten einen Überschuss an Higgs-Boson-Kandidaten in diesem Massenbereich. Um ein Maß für die Signifikanz des Effektes zu erhalten, werden zwei Likelihood-Funktionen gebildet, eine für die Hypothese „Untergrund“ und eine für „Untergrund + Signal (Higgs Boson)“. Das Verhältnis beider Likelihood-Funktionen ist in Abbildung 92 als Funktion der Higgs-Boson-Masse für die Kombination aller LEP Experimente gezeigt.

So wurden vor Ende der Datennahme bei LEP erstmals direkte Hinweise auf die Existenz des Higgs-Bosons beobachtet. Die Signifikanz dieses Signals bei einer Masse von 115 GeV ist bei Kombination der

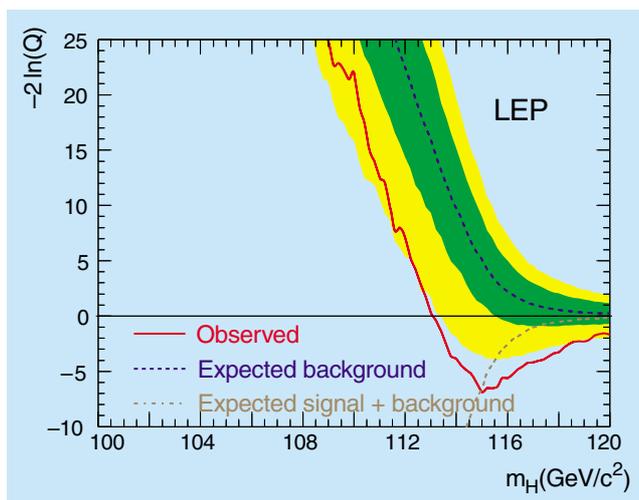


Abbildung 92: Der Logarithmus des Verhältnisses der Likelihood-Funktionen, welche die Daten mit den Hypothesen „Untergrund“ (obere unterbrochene Kurve) oder „Untergrund plus Signal“ (untere unterbrochene Kurve) vergleicht. Die durchgezogene Linie resultiert aus den Daten.

Daten aller LEP-Experimente 2.9 Standardabweichungen. Führt man diese Analyse nur für die Daten des L3-Experimentes durch, liegt die Signifikanz bei 1.5 Standardabweichungen.

Die Suche nach weiteren neutralen und geladenen Higgs-Bosonen, wie sie etwa von Zwei-Dublett-Modellen vorhergesagt werden, war negativ, und untere Grenzen für deren Massen wurden gesetzt. In einer modellunabhängigen Suche nach skalaren Teilchen, die in Assoziation mit einem Z oder paarweise erzeugt werden, wurden obere Grenzen für die Kopplungen an das Z Boson berechnet.

Suche nach SUSY-Teilchen

Die Suche nach supersymmetrischen (SUSY) Teilchen wurde fortgesetzt. Trotz hoher Energie und Luminosität konnten keine Hinweise auf supersymmetrische Teilchen gefunden werden. Deshalb wurden aus den bisher ausgewerteten Daten Grenzen für die Existenz dieser Teilchen bestimmt. Die vorläufigen Ergebnisse des L3-Experiments wurden mit den entsprechenden Daten der anderen Experimente kombiniert. So wird zum Beispiel ein Chargino mit Massenwerten kleiner 103.5 GeV mit 95% C.L. ausgeschlossen. Skalare top-Quarks existieren nur, wenn ihre Masse größer als 95 GeV ist. Die Grenzen für skalare Leptonen liegen bei 98 GeV für skalare Elektronen, 94 GeV für skalare Myonen und 85 GeV für skalare Tau-Leptonen.

Allgemeine Suche nach neuen Teilchen

Da bisher die Suche nach neuen Prozessen und Teilchen erfolglos blieb, wird die Messung bekannter Reaktionen mit den Vorhersagen des Standard-Modells verglichen, um mögliche Abweichungen durch neue physikalische Phänomene zu interpretieren. Die Messung der Wirkungsquerschnitte und Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrien bei der Produktion von Lepton-Paaren bzw. Hadronen ist bei den verfügbaren hohen Energien und Luminositäten mit Fehlern im Prozentbereich möglich.

Darüber hinaus bietet die Messung des Prozesses $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ die Möglichkeit, die Interferenz von γ -

und Z-Austausch bei hohen Energien separat für schwere Quarks zu untersuchen. Interessant ist diese Messung auch aufgrund der relativ großen $Zb\bar{b}$ - und $\gamma b\bar{b}$ -Vertexkorrekturen. Bisher wurde das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte $R_b = (e^+e^- \rightarrow b\bar{b}) / (e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})$ für die Daten bis zu Energien von 202 GeV bestimmt, es beträgt $R_b = 0.156 \pm 0.009$.

Generell hat man mit der Fermionpaar-Produktion aufgrund der Messgenauigkeit sehr gute Voraussetzungen, um zum Beispiel nach der Existenz weiterer schwerer Eichbosonen, nach Leptoquarks oder ganz allgemein nach neuen Reaktionen zu suchen, die durch 4-Fermionen-Kontaktwechselwirkungen beschrieben werden. Teilchen bzw. Prozesse treten nur kurzzeitig virtuell auf, deshalb ist man auf Reaktionen sensitiv, die kinematisch einer direkten Suche unzugänglich sind. Eine Analyse der L3-Daten zeigte, dass neue Wechselwirkungen erst oberhalb einer Energieskala von 2–18 TeV erwartet werden können, je nachdem, welches Modell zugrunde gelegt wird. Die Sensitivität gegenüber neuer Physik wird durch die Kombination der Resultate aller LEP-Experimente verbessert. Man findet als Untergrenze zum Beispiel für die Existenz weiterer neutraler Eichbosonen je nach Modell 400 GeV bis 2.2 TeV. Neue Phänomene werden allgemein erst ab einer Energieskala von 3–20 TeV erwartet.

Diese Analysen sind auch im Hinblick auf das Physikprogramm eines künftigen e^+e^- -Linearbeschleunigers von Bedeutung. Die präzisen Messungen von Fermionpaar-Endzuständen werden Tests des Standard-Modells weit über den direkt zugänglichen Energiebereich hinaus ermöglichen. Im Falle neuer Phänomene können diese bereits untersucht werden, obwohl der Prozess selbst einer direkten Beobachtung noch unzugänglich ist.

L3cosmics

Primäres Ziel ist die Messung des Energiespektrums von Myonen aus Luftschauern kosmischer Teilchen. Der Detektor, bestehend aus dem Myon-Spektrometer des L3-Experiments und einem 200 m² großen zusätzlichen Szintillationsdetektor für die Zeitmessung, ermöglicht die Messung des Spektrums im Energiebereich von 20–2000 GeV.

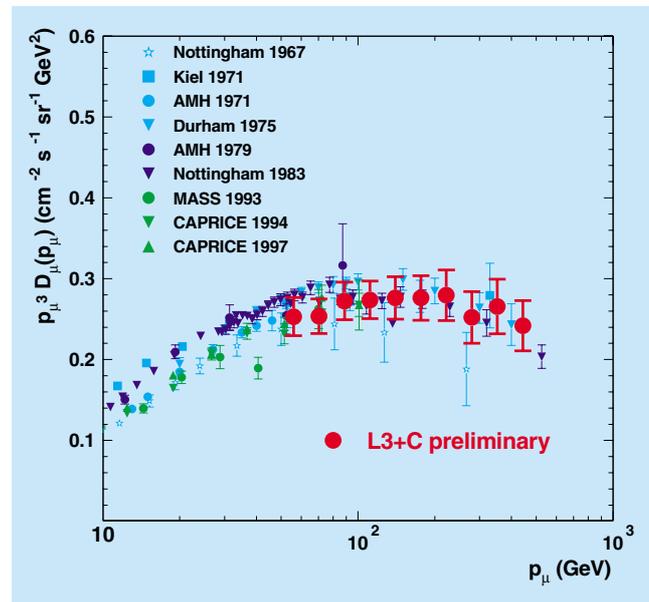


Abbildung 93: Das Impulsspektrum atmosphärischer Myonen.

Im Berichtszeitraum wurden mehr als fünf Milliarden Trigger registriert. Durch die Erweiterung der bestehenden PC-Farm zur Datenanalyse konnten die Myonspuren sofort rekonstruiert und der weiteren Analyse zugeführt werden. Die Daten des letzten Jahres wurden genutzt, um systematische Untersuchungen des inklusiven Myonspektrums im Bereich 50–500 GeV durchzuführen (Abb. 93). Erste Ergebnisse wurden auf mehreren diesjährigen Konferenzen vorgetragen und werden in den Proceedings publiziert. Der systematische Fehler beträgt gegenwärtig etwa 10%. Es wird angestrebt, durch weitere Verbesserungen der Analyse Werte von 2–3% zu erreichen.

Das Experiment wurde im Berichtszeitraum durch einen Oberflächen-Schauerdetektor aus 48 Szintillationszählern auf dem Dach eines Gebäudes oberhalb des L3-Experiments ergänzt. Damit können Energie und Richtung atmosphärischer Schauer, die von Primärteilchen im Energiebereich von 10^{14} – 10^{16} GeV ausgelöst werden, bestimmt werden. Durch Benutzung eines gemeinsamen GPS-Zeitmarkers sind Koinzidenzmessungen zwischen Myonspektrometer und Luftschauerdetektor möglich.

FTT Gruppe

Mitglieder der Gruppe FTT beteiligten sich an folgenden Projekten:

- Datenanalyse des L3cosmics Experiments,
- Verbesserung des H1 Vorwärts-Protonenspektrometers (FPS),
- Errichtung und Inbetriebnahme des Photoinjektor-teststandes,
- Testmessungen am transversalen Polarimeter von HERA.

An dieser Stelle wird nur auf die Tests am transversalen Polarimeter eingegangen, da zu den ersten drei Themen umfassende Berichte der jeweiligen Projektgruppen vorliegen.

Test am transversalen Polarimeter von HERA

Es ist vorgesehen, während der Beschleunigerpause im Jahre 2000–2001 an den Polarimetern des HERA-Elektronenstrahls eine Reihe von Verbesserungen zu realisieren. Die methodischen Studien und Vorbereitungen erfolgen im Rahmen des Projekts Pol2000. Zeuthen hat dabei den Test eines Faserdetektors übernommen.

Mit Unterstützung des technischen Bereichs wurde ein Testaufbau am transversalen Polarimeter realisiert. Dieser besteht aus einem Faserdetektor mit 16 Kanälen, der mit einem Vielkanal-Photovervielfacher über einen Multiplexer ausgelesen wird, sowie einem Szintillationstrigger.

Ziel der Arbeiten war es, eine geeignete Technologie für den Einsatz eines positionsempfindlichen Detektors zur Kalibrierung des Kalorimeters zu finden. Der Faserdetektor wurde gemeinsam mit dem Kalorimeter ausgelesen. Der Synchrotronstrahlungsuntergrund am Ort des Polarimeters ist hoch, so dass Strahlenhärte des Detektors erforderlich ist. Der Probedetektor war von November 1999 bis August 2000 im Einsatz. Die Ergebnisse werden momentan mit den Daten von Detektoren, bei denen andere Technologien (Silizium, Diamant) eingesetzt werden, verglichen.

Neutrino-Astrophysik

Die Neutrino-Astrophysik Gruppe von DESY Zeuthen beteiligt sich an zwei Experimenten zum Nachweis hochenergetischer kosmischer Neutrinos. Das Baikal-Teleskop ist im sibirischen Baikalsee installiert. Die Zeuthener Gruppe ist seit 1988 an diesem Experiment beteiligt. Das Schwergewicht der Aktivitäten liegt jedoch bei AMANDA, dem Neutrino-Teleskop am Südpol.

Das hauptsächliche Nachweisprinzip von Teleskopen für hochenergetische Neutrinos besteht in der Registrierung und zweifelsfreien Identifizierung von aufwärtslaufenden Myonen. Nur Neutrinos können den Erdball durchqueren und erzeugen, im Falle von Wechselwirkungen über den geladenen Strom, Myonen. Unterwasserteleskope bestehen aus einer gitterförmigen Anordnung von Photomultipliern (PMs), mit deren Hilfe das Cherenkov-Licht der Myonen registriert wird. Gemessen werden Ankunftszeit (mit einer Genauigkeit von 1–5 ns) und Stärke der Lichtsignale, woraus Richtung und Energie der Myonen rekonstruiert werden können.

Die einzige garantierte starke Neutrinoquelle sind in der Atmosphäre erzeugte Neutrinos. Ihre Ereignis-Rate wird durch jene von abwärtslaufenden Myonen aus der Atmosphäre um einen Faktor von etwa einer Million übertroffen. Das Experimentum crucis für Unterwasserexperimente besteht darin zunächst in effektiver Separation und korrekter Beschreibung atmosphärischer Neutrinos. Daran anschließend kann nach extraterrestrischen Effekten wie Neutrinos von Punktquellen, Neutrinos bei höchsten Energien oder Neutrinos in zeitlicher Korrelation mit „Gamma Ray Bursts“ gesucht werden. Beide Experimente, Baikal und AMANDA, haben atmosphärische Neutrinos nachgewiesen und befinden sich jetzt in der Phase, in der sie nach darüber hinausgehenden Phänomenen suchen.

Das Baikal-Experiment

Der Nachweis für das erfolgreiche Experimentieren mit Unterwasser-Neutrino-Teleskopen wurde durch das Baikal-Experiment erbracht. Im März/April 1993 wurden 36 Photomultiplier an drei Trossen installiert und nachfolgend Myon-Spuren räumlich rekonstruiert. Mit diesem Detektor wurden auch die ersten zwei aufwärtslaufenden Myonen und damit die ersten Neutrino-

Kandidaten identifiziert. Seit 1998 umfasst das Baikal-Teleskop 192 Photomultiplier an acht Trossen und registriert durchschnittlich alle drei bis vier Tage ein Ereignis mit Neutrino-Signatur. Die Energieschwelle liegt bei etwa 10 GeV.

Aus der Nichtbeobachtung von Ereignissen mit hoher Lichtemission konnte eine obere Grenze für den Fluss hochenergetischer, diffus eintreffender Neutrinos aus Quellen mit einem E^2 -Spektrum abgeleitet werden. Solche „harten“ Spektren werden für Neutrinos aus extraterrestrischen Quellen erwartet. Der Wert ($dF/dE \cdot E^2 < 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$) ist der beste bisher publizierte Grenzwert, liegt aber noch fast eine Größenordnung oberhalb der Begrenzung, die sich aus dem Fluss kosmischer Strahlen und des kosmischen Röntgenhintergrundes ergibt.

Aus einer anderen Analyse wurde eine im Vergleich zum Vorjahr leicht verbesserte Grenze für den Fluss von relativistischen magnetischen Monopolen ($F < 2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$) abgeleitet.

Die gegenwärtigen schwierigen Randbedingungen für die Forschung in Russland konnten für das Baikal-Experiment durch materielle und technische Unterstützung aus Deutschland teilweise abgefangen werden. Ein weiterer Ausbau des Detektors zu einem wirklich großen Teleskop ist aber derzeit nur schwer vorstellbar.

AMANDA

Im AMANDA-Experiment werden die Photomultiplier nicht in Wasser herabgelassen, sondern im etwa 3 km dicken Eisschild, mit dem die Antarktis bedeckt ist, installiert. Die dazu notwendigen Löcher werden mit einem 80°C heißen Wasserstrahl in das Eis geschmolzen.

In der Saison 1999/2000 wurde der Bau des AMANDA-II Detektors abgeschlossen. AMANDA-II besteht aus 19 Trossen („Strings“), von denen die ersten vier 1995/96 und die folgenden sechs 1996/97 installiert wurden. Dieser aus insgesamt zehn Strings und 302 Photomultipliern bestehende Detektor wird AMANDA-B10 genannt. 1998/99 folgten drei zwischen 1.15 und 2.3 km Tiefe mit Photomultipliern bestückte Strings. Damit sollten die Eigenschaften des flachen und des tiefen Eises in Bezug auf den zukünftigen Kubikkilometer-Detektor untersucht werden.

In der vergangenen Saison folgten schließlich sechs über 500 Meter bestückte Strings. AMANDA-II hat eine effektive Fläche von 25 000 m² für 1 TeV-Myonen und ist damit etwa 25mal so sensitiv wie die größten unterirdischen Neutrino-Detektoren. Neutrinoreaktionen lassen sich oberhalb von 35–50 GeV nachweisen.

Technologische Aspekte

Im Januar 2000 wurden unter anderem 70 optische Module installiert, die auf zwei neuen Technologien beruhen. Diese Technologien stehen als Optionen für den geplanten IceCube Detektor zur Auswahl. In einem Fall wird, wie bisher, das Analogsignal über eine optische Faser übertragen; allerdings wird die Hochspannung nicht an der Oberfläche, sondern, digital steuerbar, im optischen Modul selbst erzeugt. Dieser Modul heißt daher dAOM (digital gesteuerter Analog Optischer Modul). Der im Modul verfügbare DC/DC-Wandler ermöglicht es, einen Mikroprozessor, Verstärker, Temperatursensoren usw. zu betreiben und einen steuerbaren Vorstrom für die Licht- oder Laserdioden zu erzeugen. Im anderen Fall wird das Signal im Modul selbst digitalisiert und dann an die Oberfläche übertragen. Dieses Konzept wird DOM (Digitaler Optischer Modul) genannt.

Die Vorteile des DOM bestehen im Wegfall der teuren Lichtfaser und der verletzlichen optischen Stecker, in einem größeren dynamischen Bereich und in einer potentiell einfacheren Zeitkalibrierung. Der dAOM beruht hingegen auf einem mittlerweile langjährig eingesetzten Prinzip, ist einfacher, erlaubt ein synchrones Datenverarbeitungssystem und benötigt keine Zeitsynchronisation über 2 km elektrisches Kabel. Die dAOM-Elektronik wurde bei DESY entwickelt, der DOM beim LBNL, Berkeley (USA). DESY baute die Empfangselektronik für den DOM.

Es wurden 41 DOM und 23 dAOM installiert. Die DOM werden parallel zur Digitalübertragung auch analog über Lichtfaser ausgelesen und tragen somit zum normalen AMANDA-II-Trigger bei. Leider gelang es dem LBNL aus Zeitgründen nicht, die Schaltkreis-Programmierung zur Zeitsynchronisation und zur schnellen Datenübertragung zu vollenden. Der eigentliche Funktionsbeweis des DOM steht daher noch aus. Die entsprechenden Programme sollen während der diesjährigen Saison entweder endgültig oder teilweise in den DOM heruntergeladen werden.

Die Photomultiplier in dAOM und DOM können bei niedrigerer Spannung als in den traditionellen OMs arbeiten. Alterungseffekte wie in den Vorjahren wurden daher nicht beobachtet. Die Hochspannungsversorgung für beide OM-Versionen ist eine industrielle Sonderentwicklung und wurde vom DESY bereitgestellt.

Eine Entscheidung über die Technologie der optischen Module (dAOM vs. DOM) für IceCube soll bis April 2001 getroffen werden. In DESY Zeuthen wurden im Jahr 2000 die Komponenten für einen modernisierten dAOM für IceCube entwickelt und im Labor getestet. Darüber hinaus wurde der optische Empfängermodul so modifiziert, dass er auch die sehr kurzen Signale von Laserdioden (anstelle von LEDs) verarbeiten kann.

Physik-Resultate

Die bisherigen Ergebnisse wurden aus den 109 Ereignissen, die der B10-Detektor 1997 über 170 Tage registriert hat, gewonnen. Auch im Berichtszeitraum wurden viele systematische Untersuchungen durchgeführt, die ein besseres Verständnis des Detektors und der systematischen Effekte zum Ziel hatten. Einer der wichtigsten Schritte bestand in der Berücksichtigung der in vertikaler Richtung variierenden Eisparameter. Hier wird auch in Zukunft noch Feinarbeit zu leisten sein. Andere Verbesserungen betrafen die Pulsform, die Beschreibung des Triggers und die Luftschauersimulation. Parallel dazu wurden die Analysemethoden wesentlich verbessert. Im Ergebnis hat sich die Anzahl der aus den Daten von 1997 extrahierten Neutrino-Kandidaten etwa verdoppelt. Kombiniert man die Ergebnisse der zwei Analysen zur Separation atmosphärischer Neutrinos von DESY und der Wisconsin Universität, so

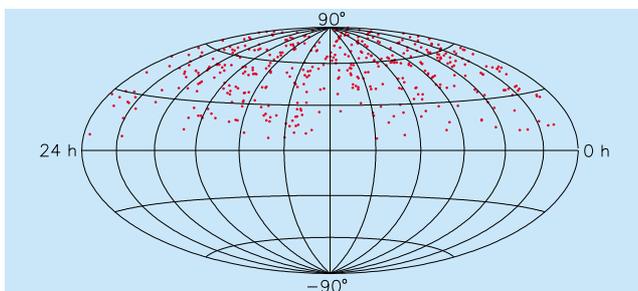


Abbildung 94: Himmelskarte der 263 Neutrino-Kandidaten des Jahres 1997. Die Beimischung falsch rekonstruierter Spuren ist < 20%.

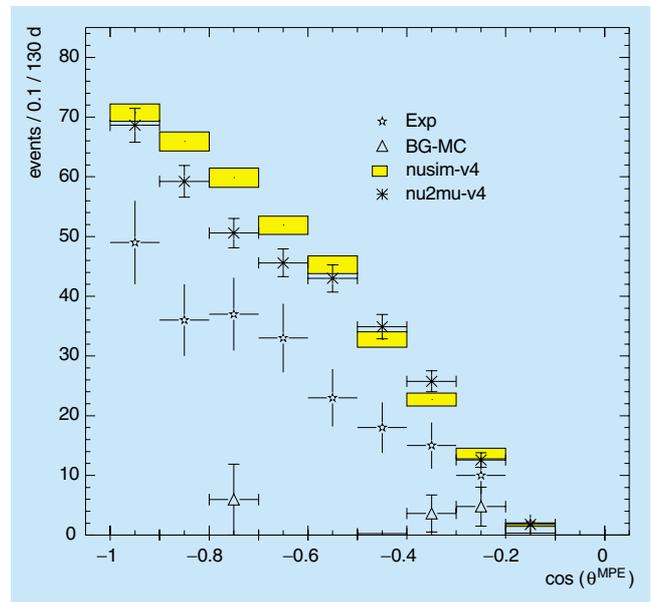


Abbildung 95: Die Zenit-Winkelverteilung der in der DESY-Analyse separierten Neutrino-Kandidaten. Die Punkte stellen die experimentellen Daten dar; die Kreuze und die Boxen die Ergebnisse zweier unabhängiger Monte Carlo-Programme für atmosphärische Neutrinos. Die Dreiecke stellen die Beimischung von Untergründereignissen dar.

ergeben sich 263 Neutrino-Kandidaten. Abbildung 94 zeigt die Himmelskarte dieser Ereignisse, Abbildung 95 die Zenit-Winkelverteilung der Ereignisse, die in der DESY-Analyse separiert wurden. Die Form der Winkelverteilung ist kompatibel mit der Erwartung für atmosphärische Neutrinos, die Anzahl wird um 30–40% zu hoch vorhergesagt, was eine weitere Verfeinerung der Monte Carlo-Programme notwendig macht. Da der B10-Detektor relativ „dünn“ ist (Höhe ≈ 400 m, Durchmesser aber nur ≈ 120 m), ist die Rekonstruktion von horizontalen Spuren problematisch. Die rigorosen Akzeptanzkriterien schneiden daher Neutrino-Ereignisse oberhalb 70° weitestgehend weg. Das wird sich durch den Ausbau von AMANDA-II in die Breite verbessern.

Aus der Nichtbeobachtung eines Überschusses von Ereignissen aus der Richtung des Erdzentrums lassen sich obere Grenzen in Bezug auf die Akkumulation und anschließende Annihilation von supersymmetrischen Dark-Matter-Teilchen (Neutralinos) in der Erde ableiten. Wegen der hohen Energieschwelle kann AMANDA erst für Neutralino-Massen oberhalb von 300–400 GeV

mit Untergrund-Experimenten konkurrieren, erreicht hier jedoch nach 170 Tagen Messzeit fast die gleichen Ausschlussgrenzen wie MACRO, Baksan und Superkamiokande nach langjährigem Betrieb.

Aus der Nichtbeobachtung eines Überschusses von korrekt rekonstruierten Neutrino-Ereignissen mit hoher Energiedeposition kann man eine obere Grenze für den Fluss hochenergetischer, diffus eintreffender Neutrinos aus Quellen mit einem E^2 -Spektrum ableiten. Vorläufige Resultate deuten eine Grenze von $dF/dE \cdot E^2 < 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ an, das heißt fast eine Größenordnung unter der vom Baikalexperiment publizierten Grenze.

In Bezug auf extraterrestrische Neutrinos aus punktförmigen Einzelquellen sind atmosphärische Neutrinos der Untergrund, über dem man nach örtlichen Anhäufungen sucht. Dabei ist es nicht störend, wenn diesem auch durch beste Richtungsrekonstruktion nicht zu beseitigenden Untergrund einige falsch zugeordnete Aufwärts-Myonen beigemischt sind. Darum können für die Suche nach Punktquellen die Akzeptanzkriterien gelockert und damit auch die Akzeptanz für Neutrino-Ereignisse selbst, das heißt die Sensitivität des Teleskops, gesteigert werden. Unter diesem Gesichtspunkt wurde eine Suche nach punktförmigen Neutrinoquellen durchgeführt. Es wurden keine signifikanten Überschüsse gefunden, woraus sich obere Grenzen von etwa $10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ergeben (unter Annahme eines E^2 -Spektrums und Normierung auf eine Schwellenergie von 10 GeV). Diese Grenzen sind vergleichbar mit jenen, die mit den kleineren unterirdischen Detektoren über viele Jahre Messzeit erhalten wurden. Für Deklinationen oberhalb 50° existieren keinerlei analoge Grenzen von anderen Detektoren.

Der Ursprung von „Gamma Ray Bursts“ (GRBs), Ausbrüchen von keV- und MeV-Strahlung über einige Millisekunden bis hin zu einigen Sekunden, ist immer noch offen. Nachdem erst seit etwa drei Jahren auch Begleitsignale von GRBs im optischen und Radiobereich gemessen wurden, würde der Nachweis von Neutrinos die Palette der diskutierten Modelle für diese Ausbrüche erheblich einschränken. Engt man die Suche auf kleine Zeitintervalle ein, zum Beispiel auf einige Sekunden vor und nach GRBs, so kann man die Kriterien nochmals lockern und die Sensitivität des Detektors weiter steigern. Aus der Nichtbeobachtung von Koinzidenzen mit einem der 88 GRBs, die

1997 im Gesichtsfeld von AMANDA lagen, ergibt sich eine kumulative obere Grenze für den Gesamtfluss von $dN/dE \cdot E^2 < 4 \cdot 10^{-4} \text{ TeV cm}^{-2}$. Dieser Wert liegt noch mehr als eine Größenordnung über entsprechenden theoretischen Oberwerten, die wahrscheinlich erst mit dem IceCube-Detektor und einem Ersatz des im Sommer 2000 beendeten BATSE-Experiments auf dem GRO-Satelliten unterboten werden können.

Die Obergrenzen für relativistische magnetische Monopole, die sich durch sehr helle Spuren auszeichnen (8300mal so starke Lichtabstrahlung wie ein minimal ionisierendes Myon) wurden auf $0.62 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ bei $\beta = v/c \approx 1$ verbessert.

AMANDA kann wegen des Fehlens optischer Störsignale im Eis auch kleine Änderungen der PM-Rauschraten registrieren. Erhöhungen der Rauschraten über einige Sekunden könnten durch viele niederenergetische Neutrino-Reaktionen infolge einer Supernova-Explosion in unserer Galaxis hervorgerufen werden. Basierend auf der in diesem Jahr abgeschlossenen Analyse der Rauschraten der Jahre 1997/98 soll im nächsten Jahr ein Online-Monitor installiert werden, der mit der gegenwärtigen Sensitivität etwa 70% unserer Galaxis auf Supernovae überwacht.

Das Schwergewicht der DESY-Aktivitäten für das kommende Jahr wird im Abschluss der Analyse der 1997er Daten und dem Beginn der Analyse der 2000er Daten liegen. Andere Gruppen konzentrieren sich auf die Daten der Jahre 1998/99. Gleichzeitig werden Untersuchungen zum IceCube Detektor durchgeführt, die von der Untersuchung des Physik-Potentials und der Simulation bis zur Technologievorbereitung reichen sollen. Diese Untersuchungen sollen als Entscheidungsgrundlage für eine mögliche Beteiligung am IceCube-Projekt dienen.

Theoretische Elementarteilchenphysik

Quantenchromodynamik

Auf dem Gebiet der störungstheoretischen Quantenchromodynamik (QCD) wurden Fragestellungen zur tiefunelastischen Streuung und zur e^+e^- -Annihilation

bearbeitet. Diese Untersuchungen stehen in sehr engem Zusammenhang mit Aufgabenstellungen der HERA-Experimente ZEUS, H1 und HERMES, sowie der Experimente bei LEP, SLAC und TESLA.

Eine zentrale Frage bei der Betrachtung inklusiver Prozesse bei hohem Impulsübertrag im Rahmen der störungstheoretischen QCD ist die nach dem Verhalten der Korrekturen im Vergleich zweier Prozesse, die durch Kanal-Kreuzung ineinander übergehen. So kann man die tiefunelastische Streuung $e^-p \rightarrow e^-X$ und den Elektron-Positron Paarvernichtungsprozess $e^+e^- \rightarrow \bar{p}X$ in direkte Beziehung setzen. Beide Prozesse gehen durch Kreuzung vom t - in den s -Kanal ineinander über. Es ist nicht zu erwarten, dass eine Transformation des Gesamtprozesses gelingt, wie ursprünglich von Drell et al. vermutet. Jedoch konnte gezeigt werden, dass das Skalenverhalten beider Prozesse durch eine analytische Fortsetzung bis zur zweiten Ordnung in der starken Kopplungskonstante ineinander übergeht [DESY 98-144], und sich damit eine interessante Testmöglichkeit für die QCD eröffnet.

Allgemeine Untersuchungen zur mathematischen Struktur von QCD Evolutionskernen bis zur zweiten Ordnung in der Kopplungskonstante wurden durchgeführt [DESY 00-005]. Sie finden direkte Anwendung in schema-invarianten QCD-Evolutions Programmen.

Um das Verhalten von Strukturfunktionen bei niedrigeren Impulsüberträgen und kleinen Werten der Skalierungsvariable x_B zu verstehen, ist die Untersuchung sogenannter „higher twist“ Beiträge wesentlich. Es wird erwartet, dass in diesem Bereich die Strukturfunktionen ein quantitativ neues Verhalten aufweisen („screening“, „saturation“), was durch Streuung von Elektronen aus dem geplanten TESLA-Beschleuniger an Protonen des HERA-Beschleunigers nachgewiesen werden könnte (THERA-Projekt).

Neben der tiefunelastischen Lepton-Hadron Streuung sind Tests der Quantenchromodynamik in einer weiten Klasse von ähnlichen Streuprozessen, der sogenannten nicht-vorwärts Compton-Streuung möglich, die bei großen Impulsüberträgen in den HERA-Experimenten H1, ZEUS und HERMES durchgeführt werden kann. In Verallgemeinerung der in der tiefunelastischen Streuung gemessenen Partonen-Dichten werden in der nicht-vorwärts Compton-Streuung Amplituden vermessen, die häufig als „skewed parton densities“ bezeichnet

werden. Wie auch im Fall der Vorwärtsstreuung (tief-unelastische Streuung) sind einige der Verteilungen experimentell besser zugänglich als andere. Deshalb ist es wichtig, nach eventuellen theoretischen Relationen zwischen den verschiedenen Verteilungsfunktionen zu suchen, um eine weitgehend vollständige Beschreibung dieser Prozesse zu ermöglichen. Dies konnte für den Fall der virtuellen Photon-Streuung gezeigt werden [DESY 00-005, 045], indem für die Beiträge in niedrigster Ordnung die für die tiefunelastische Streuung bekannten Relationen von Callan und Gross und Wandzura und Wilczek erstmalig auf den nicht-vorwärts Fall verallgemeinert worden sind.

Weiter wurden die nächstführenden QCD-Korrekturen zum Produktionsquerschnitt von schweren Quark-Antiquark-Paaren in Photon-Photon Kollisionen für beliebige Polarisationszustände berechnet [DESY 00-057] sowie die Asymmetrien der J/ψ -Photoproduktion im Rahmen der nicht-relativistischen QCD Faktorisierung [DESY 99-110].

In einer Vielzahl von theoretischen Erweiterungen des Standard-Modells erscheinen als neue physikalische Teilchen Leptoquarks. Diese Elementarteilchen tragen die Quantenzahlen der beiden Gruppen von Fermionen des Standard-Modells, der Leptonen und der Quarks. Sie können Massen im kinematischen Bereich der im Betrieb befindlichen bzw. für die nahe Zukunft geplanten Teilchenbeschleuniger haben. Die Suche nach diesen Teilchen ist deshalb ein interessanter Aspekt des experimentellen Programms an diesen Anlagen. Die Produktionseigenschaften von Leptoquarks in Photon-Photon und Elektron-Positron Reaktionen an zukünftigen Elektron-Positron Linearbeschleunigern wurde untersucht [DESY 99-072, hep-ph/0009323]. Hierbei zeigte sich, dass für skalare Leptoquarks im Bereich der Produktionsschwelle bei Photon-Photon-Streuung Korrekturen der starken Wechselwirkung von großer Bedeutung sind. Für diese Reaktion ist die Bildung von Leptoquark-Bindungszuständen in bestimmten Massenbereichen möglich. Ebenso wurde die Genauigkeit untersucht, mit welcher die elektroschwachen Kopplungen dieser Teilchen an zukünftigen Linearbeschleunigern vermessen werden können.

In enger Zusammenarbeit mit Physikern aus den vier LEP-Experimenten wurden die für die finale Datenanalyse benötigten Programmpakete verbessert,

getestet und nach einheitlichen Kriterien beschrieben. Unsere Arbeitsgruppe trug mit den Programmen ZFITTER (Beschreibung der Zwei-Fermion-Produktion mit Strahlungskorrekturen) und GENTLE (Beschreibung der Vier-Fermion-Produktion mit Strahlungskorrekturen) zum Erfolg des LEP2-Monte Carlo-Workshops (1999/2000) bei. Die Resultate sind dokumentiert in Beiträgen der Zwei-Fermion- und Vier-Fermion Arbeitsgruppen in den Proceedings [CERN 2000-009, hep-ph/0005309, 0007180].

Die hohe Präzision der LEP2-Daten erlaubt nun auch ihre Einbeziehung in die Analyse der Z-Resonanz, die im Wesentlichen auf den Daten von LEP1 basiert. Insbesondere die Photon Z-Boson Interferenz kann dadurch frei von Modellannahmen gemessen werden, wenn man mit Begriffen der S-Matrix-Theorie arbeitet. Dieser Zugang wurde in unserer Gruppe ausgearbeitet und seine Anwendung durch die experimentellen Kollaborationen unterstützt. Zum Thema der Zwei-Fermion-Produktion wurde eine Doktorarbeit abgeschlossen, deren Resultate für die Analyse photonischer Korrekturen mit speziellen Schnitten auf die Produktionswinkel der Fermionen – Akzeptanz- und Acolinearitätswinkel – benötigt werden [DESY-THESIS-2000-030]. Es ist zu erwarten, dass auch die finale Datenauswertung aller vier LEP-Experimente durch Programm-Pakete aus DESY Zeuthen unterstützt werden wird.

Untersuchungen zu TESLA

Das Jahr 2000 wurde weiterhin geprägt durch die Vorbereitungen zum TESLA-Proposal. Das erwähnte Projekt ZFITTER wurde auf seine Eignung für eine Anwendung bei Linearbeschleuniger-Energien untersucht und erste Schritte zur Anpassung unternommen [hep-ph/0002054]. Mehrere Studien waren der Produktion von top-Quarks gewidmet, sowohl den Strahlungskorrekturen bei der Paar-Produktion im Kontinuum, also nicht an der kinematischen Produktionsschwelle [DESY 00-073], als auch der Produktion der top-Quarks mit anschließendem Zerfall in der minimal erweiterten supersymmetrischen Theorie [DESY 00-036].

Der Beschleuniger TESLA erlaubt auch den Betrieb auf der Z-Resonanz-Energie (die GigaZ-Option). Dadurch ist die Untersuchung von seltenen Z-Zerfällen möglich, die im Standard-Modell zunächst verboten sind, jedoch

durch Effekte höherer Ordnung oder konzeptionelle Erweiterungen möglich werden, wie sie Ideen der „Grand Unified Theories“ (GUT) oder String- und Superstring-Modelle nahelegen. Als ein wichtiges Beispiel, gerade auch im Hinblick auf die vermutlich nachgewiesenen Neutrinomassen in Experimenten der Astrophysiker, wurden Lepton-Flavor verletzende Zerfälle untersucht. Es zeigt sich, dass mehrere Szenarien dazu mit GigaZ studiert werden können [DESY 99-165, 00-072, 127]. Schließlich wurde auch die Möglichkeit der Resonanz-Produktion schwerer Higgs-Bosonen im MSSM mit der Photonbeschleuniger-Option von TESLA studiert [DESY 99-167].

Außerdem wurde im Rahmen des „ECFA/DESY Linear Collider Workshop“ die theoretische Arbeitsgruppe „The Loop Verein“ organisiert. Ziel ist die Koordination und Anregung von Aktivitäten, die zu einem präziseren Verständnis von Hochenergie-Prozessen führen, wie es den erhöhten Anforderungen des TESLA Projekts entspricht.

Feldtheorie

Quantenfeldtheorien mit chiralen Fermionen stellen bei der unvermeidlich notwendigen Regularisierung der Ultraviolett-Divergenzen immer noch ein ernsthaftes Problem dar, zumindest in praktischer Hinsicht. Daher wurde das Problem der paritätsverletzenden Dirac-Matrix γ in der dimensionellen Regularisierung im Kontext chiraler Felder erneut untersucht und eine Regel hergeleitet, wie man die Verletzung der chiralen Symmetrie weitgehend umgehen kann [DESY 00-075].

Ein weiteres Projekt befasste sich mit der Präzisionsmessung des totalen hadronischen Wirkungsquerschnittes an der ϕ -Fabrik DAΦNE in Frascati. Dazu wurde eine genauere Berechnung der Strahlungskorrekturen zur Hadronproduktion in der e^+e^- -Vernichtung bei niedrigen Energien abgeschlossen [DESY 00-163]. Die verbesserte Messung des hadronischen Wirkungsquerschnittes wird es ermöglichen, die hadronischen Beiträge zur effektiven Feinstrukturkonstante $\alpha(M_Z)$ und zum anomalen magnetischen Moment $g-2$ des Myons wesentlich genauer zu bestimmen.

Für ein Detailverständnis von Hochenergieprozessen an zukünftigen Linearbeschleunigern (TESLA) ist eine

Untersuchung der Multi-Fermion Produktion von besonderem Interesse. Masseneffekte für die Vierfermionproduktion in der e^+e^- -Vernichtung mit und ohne harte Bremsstrahlung wurden untersucht [DESY 00-164]. Dabei wurde ein effizientes numerisches Verfahren weiterentwickelt. Es zeigt sich, dass man selbst für die „leichten“ Fermionen (das heißt alle außer dem top-Quark) mit Massenkorrekturen bis zu einigen Prozent rechnen muss, wenn man mit hoher Auflösung arbeitet.

Ein genaueres Verständnis der elektroschwachen Präzisionsdaten, wie sie von LEP erzielt wurden oder in Zukunft von dem oben erwähnten GigaZ Experiment zu erwarten sind, erfordert eine wesentliche Verbesserung der theoretischen Vorhersagen im Standard-Modell. Davon ist zum Beispiel die Aussagekraft der indirekten Higgs-Massenlimits entscheidend abhängig. Dazu werden extrem komplizierte Berechnungen von Strahlungskorrekturen höherer Ordnung notwendig. Dabei treten zunächst eine Reihe von ungelösten technischen Problemen auf. Hier wurden bei der Berechnung der analytischen Struktur von Termen beliebig hoher Ordnung in der Entwicklung in 4-D, der Abweichung der Raum-Zeit-Dimension vom physikalischen Wert 4, wie sie bei der dimensionellen Regularisierung benötigt werden, wesentliche Fortschritte erzielt [hep-th/0005287]. Der lineare Term in der Entwicklung in 4-D konnte für eine Reihe von Zweischleifen-Diagrammen mit verschiedenen Schwellenstrukturen in analytischer Form berechnet werden [DESY 00-062]. Außerdem wurde das auf der Programmiersprache „FORM“ beruhende Programmpaket „ON-SHELL2“ weiterentwickelt. Es erlaubt die Berechnung einer speziellen, für physikalische Anwendungen wichtigen Klasse von Zweischleifen-Selbstenergie-Diagrammen [hep-ph/9907431].

Die Frage nach der Natur und den Eigenschaften der Neutrinos war auch in diesem Jahr im Zentrum des Interesses der Teilchenphysiker, vor allem weil wiederum wichtige experimentelle Fortschritte erzielt wurden. Der Frage, was sich aus Sicht heutiger und in den nächsten Jahren zu erwartender experimenteller Daten über den Typ, Dirac oder Majorana, der bekannten Neutrinos aussagen lässt, wurde nachgegangen [hep-ph/0003161]. Dabei wurden 3- und 4-Neutrino Szenarien durchgespielt. Vom Typ unabhängige Massenschranken wurden hergeleitet [hep-ph/0010077].

In supersymmetrischen Erweiterungen des Standard-Modells, welche die R-Parität verletzen, wurde die Pro-

duktion einzelner Charginos in Lepton-Lepton Kollisionen untersucht. Unter Berücksichtigung existierender Schranken zur R-Paritäts Verletzung findet man Produktionsquerschnitte von der Ordnung $O(10 \text{ fb})$ [hep-ph/0003228].

QCD auf dem Gitter

Ein weiterer Schwerpunkt war die Untersuchung der Quantenchromodynamik im Niederenergiebereich. Hier versagt der auf Feynman-Diagrammen basierende störungstheoretische Zugang, die grundlegende Technik in den oben beschriebenen Arbeiten. Mit Hilfe von Monte Carlo-Simulationen der QCD auf Raumzeitgittern lassen sich jedoch allgemeine Vorhersagen der Theorie gewinnen.

Die Theoriegruppe engagiert sich in solchen numerischen Rechnungen sowie deren theoretischer Vorbereitung vorwiegend im Rahmen der ALPHA Kollaboration. Diese hat in der Vergangenheit die Energieabhängigkeit der laufenden Kopplung in der Yang-Mills Theorie – der QCD ohne Quarks – in einem Bereich zwischen etwa 1 GeV und 200 GeV berechnet. Unterhalb von 1 GeV werden diese Rechnungen numerisch sehr aufwendig. Daher wurde dieser Bereich erst in diesem Jahr auf den neuen APE1000 Rechnern im Detail untersucht. Es zeigt sich, dass die Kopplung im gewählten Renormierungsschema bei niedrigen Energien sehr stark ansteigt und unterhalb von 1 GeV Energie wesentlich von der Störungstheorie abweicht [DESY 00-138].

Die Simulationsprogramme für dieses Projekt dienen auch gleichzeitig als Testprogramme für die neuen Compiler auf APE1000 und für Langzeit Hardware-Tests und werden nun für die Inbetriebnahme neuer Hardware eingesetzt.

Von großem Interesse ist das theoretische Verständnis der Energieabhängigkeit der laufenden Kopplung in der QCD unter Einschluss der Quark-Freiheitsgrade. Deren Behandlung in Monte Carlo-Simulationen ist allerdings numerisch sehr aufwendig. Eine Reihe von Simulationen wurde daher durchgeführt, die neben den gewünschten physikalischen Ergebnissen auch die Effizienz einer Auswahl bekannter Algorithmen bestimmten [DESY 00-104]. So wurde für zukünftige Rechnungen der optimale Algorithmus isoliert. Dieser ist in

einer ersten Version für APE1000 implementiert und in Teilen bereits optimiert. Die Optimierung anderer Teile wird ständig verbessert. Im Laufe dieser Programmentwicklung gab es ständige Zusammenarbeit mit den Softwareentwicklern im APE-Projekt. So wurde einerseits eine gute Optimierung der QCD-Programme, andererseits eine Verbesserung der Stabilität von Compiler und Betriebssystem-Software erreicht.

Neben der laufenden Kopplung wurde eine Reihe weiterer Fragen behandelt. Die Dynamik der leichten pseudoskalaren Mesonen wird approximativ durch die so genannte chirale Störungstheorie beschrieben. Sie ist eine systematische Entwicklung für Streuprozesse bei niedrigen Energien. Ihre Vorhersagen beruhen auf einer Reihe von Konstanten, die bisher durch Anpassung der Theorie an experimentelle Messgrößen festgelegt wurden.

Eine neue Methode erlaubt es, diese Niederenergiekonstanten durch Monte Carlo-Simulationen der QCD zu berechnen und hiermit die Präzision der chiralen Störungstheorie zu verbessern. Bisher wurden numerische Resultate in der „quenched Approximation“ der QCD erhalten [DESY 00-090]. Eine mehr technisch orientierte Arbeit befasste sich mit der Möglichkeit, die durch das Gitter eingeführten Diskretisierungsfehler besser zu kontrollieren [DESY 00-131].

Im Rahmen einer Dissertation wurde die theoretische Grundlage für die Behandlung schwerer Quarks in der Gitterquantenchromodynamik weiterentwickelt [DESY 00-091]. Die untersuchten Konzepte wurden numerisch angewendet, um die korrekte Normierung des Axialstroms zu bestimmen [DESY 00-138]. Hierauf aufbauend wird man in Zukunft eine präzise Berechnung leptonischer Zerfälle von B-Mesonen durchführen können.

Sowohl bei strukturellen als auch bei numerischen Untersuchungen von Quantenfeldtheorien muss man die Raum-Zeit oft auf ein endliches Gebiet einschränken, wobei die Frage von Randbedingungen wesentlich wird. Hier treten insbesondere bei der Berücksichtigung von Instantonen ernsthafte Schwierigkeiten auf. Die Untersuchungen von Instantonen auf toroidaler Raum-Zeit konzentrierte sich auf den doppeltperiodischen Fall ($T^2 \times R^2$) [DESY 00-080]. Die analytischen Resultate erlauben es, mittels numerischer Analyse deren Monopolkonstituenten sichtbar zu machen.

Zweidimensionale Quantenfeldtheorien sind wichtige „Laboratorien“ zur Untersuchung von nichtstörungstheoretischen Eigenschaften und Effekten von Quantenfeldtheorien im allgemeinen. Mit eichinvarianter Hamilton- und Lagrangereduktion wurde die $SL(2,R)/U(1)$ -WZNW-Theorie eines Schwarzen Loches direkt integriert und die parafermionischen Erhaltungsgrößen als deren Coset-Ströme identifiziert [hep-th/0003246]. Mittels kanonischer Quantisierung deformieren sich die Parafermionen, ihre Algebra und der Energie-Impuls-Tensor in selbstkonsistenter Weise.

Internationale Zusammenarbeit

Die Theoriegruppe ist im Rahmen der Programme „Training, Mobility and Research“ an vier Projekten der Europäischen Gemeinschaft beteiligt:

- „Quantum Chromodynamics and the Deep Structure of Elementary Particles“: Die zentrale Aufgabe des Netzwerkes ist die systematische theoretische Untersuchung der Protonstruktur, und es führt 24 europäische Universitäten und Forschungsinstitute aus zehn Ländern zusammen. Das Netzwerk hat neun Stellen für Nachwuchs-Wissenschaftler für je drei Jahre erhalten. Eine Stelle teilen sich DESY Zeuthen und die Universität Leiden. Die diesjährige Fachtagung des Netzwerkes fand im September 2000 in Paris statt und war zugleich das mid-term Treffen. Die Evaluation der Arbeit des Netzwerkes durch die Europäische Gemeinschaft fiel sehr positiv aus. Dem Netzwerk wurde empfohlen, einen Nachfolgeantrag im Frühjahr 2001 zu stellen.
- „EURODAPHNE: High Precision Elementary Particle Physics at the ϕ -Factory DAΦNE“: Zweck des Projekts ist die Untersuchung fundamentaler Symmetrien sowie elektroschwacher und starker Prozesse, wie sie bei der Europäischen ϕ -Factory DAΦNE untersucht werden können. Beteiligt sind 20 Institute/Universitäten, welche in neun Knoten organisiert sind. Das Netzwerk hat neun Stellen für Nachwuchs-Wissenschaftler jeweils für drei Jahre erhalten. Eine Stelle teilen sich DESY Zeuthen und die Universität Karlsruhe. Die Evaluation des Projekts ist sehr positiv verlaufen. Eine Verlängerung für die zweite Hälfte des Antragszeitraumes bis 2004 wurde problemlos genehmigt.

- „Particle Physics Phenomenology at High Energy Colliders“: Die zentrale Aufgabe des Netzwerkes ist die systematische theoretische Untersuchung der Bausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen, wie sie an Hochenergie-Beschleunigern erzeugt werden können, sowie die Ausbildung von jungen Wissenschaftlern. Das Netzwerk nahm in diesem Jahr die Arbeit auf. Mitarbeiter von 34 europäischen Universitäten und Forschungsinstituten in elf Ländern arbeiten hier zusammen. Das Netzwerk hat neun Stellen für Nachwuchs-Wissenschaftler für je zwei Jahre erhalten, eine Stelle teilen sich DESY und die Universitäten Bielefeld und Freiburg.
- „Hadron Phenomenology from Lattice QCD“: Dieses Netzwerk hat die Weiterentwicklung der Gittereichtheorien und deren Anwendung in der Phänomenologie der Hadronen zum Ziel. Es enthält neben DESY-Zeuthen neun weitere Knoten in vier europäischen Ländern. In Rahmen dieses Netzwerkes wurden für DESY/NIC Zeuthen Stellen für Nachwuchs-Wissenschaftler bewilligt.

Die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus Polen, Russland und Bulgarien wurde durch die Alexander-von-Humboldt Stiftung, das Landau-Heisenberg-Programm und das INTAS-Programm gefördert.

Unter reger Beteiligung von Mitgliedern der Theoriegruppe von DESY Zeuthen wurde im Rahmen des Landau-Heisenberg-Programms am Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics in Dubna vom 9. bis 23. Juli der Workshop „Calculations for Modern and Future Colliders“ durchgeführt.

Zum Thema „Integration und Quantisierung nicht-nilpotent geeichter Wess-Zumino-Novikov-Witten konformer Feldtheorien“ wurde ein dreijähriges deutsch-georgisches DFG-Projekt bewilligt.

Zusammenarbeit mit Universitäten

Die Arbeitsgruppe ist am Graduiertenkolleg „Das Standard-Modell der Teilchenphysik – Struktur, Präzisionstests, Erweiterungen“ (FU Berlin, HU Berlin, DESY Zeuthen, TU Dresden) beteiligt.

Die ALPHA Kollaboration für Gitter QCD, an der Wissenschaftler der Universitäten HU Berlin, Münster, Li-

verpool, Milano, RomII und der Institute CERN sowie MPI München beteiligt sind, wird von Zeuthen aus koordiniert.

Organisation von Fachtagungen

Im Berichtszeitraum wurde durch Mitarbeiter der Theoriegruppe die internationale Fachtagung „Loops and Legs in Quantum Field Theory“ ausgerichtet, die im April in Bastei/Elbsandsteingebirge stattfand (66 Teilnehmer). Es war die fünfte internationale Konferenz in zweijähriger Folge zu aktuellen Problemen der störungstheoretischen Quantenfeldtheorie.

Der ECFA-Workshop on „High Performance Computing in Lattice Field Theory“ im Oktober 2000 mit 60 Teilnehmern wurde ausgerichtet von DESY und NIC als lokalen Organisatoren und dem ECFA Panel als internationalem Advisory Committee.

APE Projekt/ Parallelrechnerentwicklung

Das „Zentrum für Paralleles Rechnen“ (ZPR) betreibt als Teil des John von Neumann-Instituts für Computing (NIC) massiv parallele Supercomputer vom Typ APE und stellt die Rechenleistung im Rahmen des NIC zur Verfügung. Diese Spezialrechner mit SIMD Architektur (Single Instruction Multiple Data) bieten für bestimmte numerische Probleme hohe Rechenleistung bei einem günstigen Preis-Leistungs Verhältnis. Hauptnutzer dieser APE Rechner sind DESY übergreifende Großprojekte, die numerische Simulationen von Feldtheorien auf dem Gitter durchführen. Solche Gittereichtheorien bilden ein wichtiges Teilgebiet der theoretischen Elementarteilchenphysik und beschreiben unter anderem die starke Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen. Darüber hinaus werden auch andere Problemstellungen aus der naturwissenschaftlich-technischen Forschung untersucht, beispielsweise Berechnungen elektromagnetischer Felder in supraleitenden Hohlraumresonatoren, wie sie bei Teilchenbeschleunigern zum Einsatz kommen.

Seit 1994 sind in Zeuthen APE Rechner der ersten Generation (APE100) im Einsatz. Insgesamt ist eine

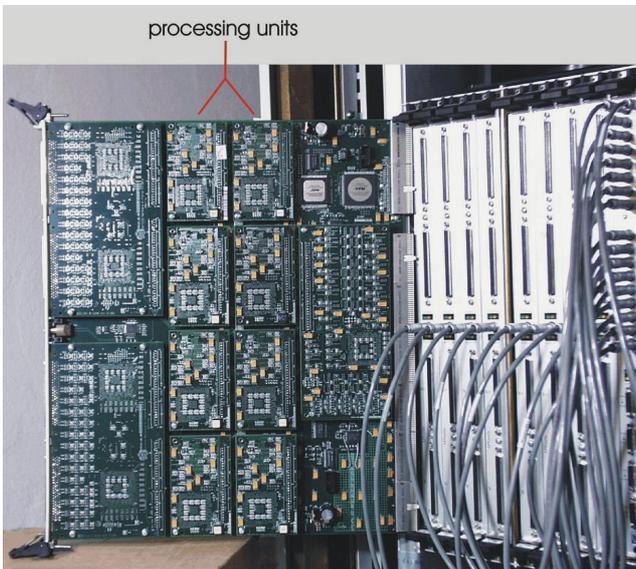


Abbildung 96: Das Bild zeigt ein APEmille Crate mit einem herausgezogenen Processorboard (12 U). Die acht Processing Units, deren Kernstück die Floating Point Prozessoren bilden, belegen den Mittelteil des Boards. Die Spitzenleistung eines Boards beträgt insgesamt 4 Gflops. Mit einem QCD Programm wurden 2.4 Gflops reale Rechenleistung erreicht.

Rechenleistung von 45 Gflops installiert. Die Maschinen laufen sehr zuverlässig und wurden von den internationalen Forschungsk Kooperationen zu mehr als 90% ausgelastet.

Im Februar 2000 wurde in Zeuthen ein erstes Crate der neuen Generation von APE-Rechnern, der APEmille, installiert und in Betrieb genommen. Das Crate enthält 16 Processing Boards mit je acht Prozessoren (Abb. 96). Diese Prozessoren sind optimiert für Gleitkomma-Arithmetik mit komplexen Zahlen und leisten maximal je 528 MFlops. Die Prozessoren sind durch ein sehr leistungsfähiges dreidimensionales Kommunikationsnetzwerk verbunden. Der Zugang zu den Prozessoren erfolgt über ein separates Netzwerk von Linux-PCs. Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme eines weiteren Crates im September steht nun für die Physikprojekte eine Spitzenleistung von über 130 GFlops zur Verfügung.

APEmille wurde im Rahmen des APE-Projektes („Array Processor Experiment“) am italienischen Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Kollabora-

tion mit DESY entwickelt. In Zeuthen wurden Beiträge zur Compiler Software geleistet und Hardware für die schnelle Kommunikation (bis zu 100 Mbyte/s) zwischen den Linux-PCs entwickelt. Darüber hinaus wurden umfangreiche Tests durchgeführt, um die Hardware zu qualifizieren und die Funktionsfähigkeit der Software zu optimieren. In der ersten Jahreshälfte 2001 wird der Ausbau der APEmille-Systeme auf mehr als 900 Prozessoren mit einer Spitzenleistung von über 450 Gflops erfolgen.

Für die zukünftige Forschung in Europa auf dem Gebiet der Gittereichtheorien hat eine Arbeitsgruppe des „European Committee for Future Accelerators“ (ECFA) einen Rechenleistungsbedarf von insgesamt 10–20 TFlops ermittelt. Um diese Leistung zu realisieren, wurde von den Arbeitsgruppen am INFN und bei DESY Zeuthen ein Vorschlag für eine neue Generation von APE-Rechnern, apeNEXT, ausgearbeitet und wesentliche Entwicklungsstudien durchgeführt. Die gemeinsamen Aktivitäten, an denen auch eine Gruppe der Université Paris-Sud beteiligt ist, sind zunächst auf die Inbetriebnahme eines Prototyprechners mit einer Rechenleistung von 200–400 Gflops im Jahr 2002 gerichtet.

NIC bei DESY Zeuthen

Am 1. Oktober 2000 wechselte die Forschungsgruppe „Elementarteilchenphysik“ des John von Neumann-Instituts für Computing (NIC) von ihrem alten Standort in Jülich nach Zeuthen. Das NIC ist eine gemeinsame Einrichtung des Forschungszentrums Jülich und DESYs zur Förderung der supercomputergestützten naturwissenschaftlich-technischen Forschung und Entwicklung in Deutschland. Der Umzug der NIC-Gruppe nach Zeuthen verstärkt die existierenden Aktivitäten auf dem Feld der Gittereichtheorien an diesem Standort deutlich.

Eine der ersten Initiativen der NIC Gruppe in Zeuthen war die Organisation des „ECFA Workshop on High Performance Computing in Lattice Field Theory“, der am 6./7. Oktober stattfand. Der Workshop geht auf eine Empfehlung des ECFA Panels zurück, niedergelegt im ECFA Report, CERN 2000-002, ECFA/00/200. In diesem Bericht wird das Physik-Potential von Maschinen

diskutiert, die Rechenleistungen von mehreren Teraflop haben. Eine Schlussfolgerung des Berichtes ist, dass mit solchen Maschinen ein beträchtlicher Fortschritt in der Gitterfeldtheorie erreicht werden kann. Es ist deshalb eine der Empfehlungen des Berichtes, solche Rechner zu entwickeln und diese den europäischen Gitterphysikern zur Verfügung zu stellen. Dies könnte durch eine Weiterentwicklung der APE-Linie in Form eines apeNEXT Systems realisiert werden. Es ist eine momentan offene Frage, inwieweit kommerziell erwerb- bare PC-Cluster eine Alternative sind. Um dieses Ziel zu erreichen, wird auch empfohlen, eine Koordination der europäischen Aktivitäten zu erreichen.

Arbeiten zum TESLA Projekt

DESY Zeuthen ist an den konzeptionellen Arbeiten für einen 500 GeV Elektron-Positron Linear-Collider mit integriertem Röntgenlaser aktiv beteiligt. Im Berichtszeitraum wurden dabei drei Linien verfolgt:

- Studien zur Physik, zu Untergrundproblemen und zur Detektorentwicklung mit dem Ziel, Beiträge zum „Technical Design Report“ für den TESLA Linear-Collider zu erstellen,
- die Entwicklung von Diagnostikelementen für die TESLA Test Facility (TTF) und den Freie-Elektronen Laser (FEL) weiterzuführen,
- die Errichtung eines Photoinjektor-Teststands mit der Aufgabe, ein gezieltes R&D-Programm für die Erzeugung geeigneter Elektronen-Strahlen für TESLA und den FEL durchzuführen.

Arbeiten im Rahmen der „ECFA/DESY Study on Physics and Detectors for an e^+e^- Linear Collider“

Im Jahr 2000 wurden vorläufige Versionen einzelner Kapitel des Technical Design Reports (TDR) für den TESLA Linear-Collider geschrieben. Die endgültige Version wird bis zum Frühjahr 2001 fertiggestellt sein. Innerhalb des ECFA/DESY Workshops wird die Arbeitsgruppe „Electroweak Interactions“ von Zeuthen aus mit koordiniert. Außerdem ist Zeuthen maßgeblich

an den Arbeiten für die Optimierung der Spurrekonstruktion des Detektors beteiligt. Das Kapitel über elektroschwache Eichbosonen sowie mehrere Unterkapitel im Detektorteil wurden dabei von Zeuthener Mitarbeitern verfasst. Außerdem gab es Beiträge zu folgenden Themen:

- Physikalische Analysen zum Higgs-Boson im Standard-Modell (Messung der Masse, Querschnitte und Verzweigungsverhältnisse) im Energiebereich von 300 bis 500 GeV,
- Untersuchung der Wtb-Kopplung in der Paarerzeugung und bei der Erzeugung einzelner top-Quarks,
- Studien der Zwei-Fermion-Produktion bei hohen Energien und Interpretation dieser Prozesse im Rahmen neuer Physik,
- Studien von stop- und sbottom-Produktion im Rahmen supersymmetrischer Modelle,
- Studien zur elektroschwachen Physik mit der Z-Option des Linear-Colliders,
- Software-Entwicklungen zu den Detektorsimulationsprogrammen BRAHMS und SIMDET,
- Pflege der Detektorsoftware und der zugehörigen Web-Seite,
- Entwicklung eines Detektor-Graphik-Programms,
- Untersuchungen zur Optimierung der Spurrekonstruktion geladener Teilchen unter besonderer Berücksichtigung des Vorwärtsbereichs,
- Untersuchungen zur Messung der Beamstrahlung und der Energieunschärfe des Strahls mit Hilfe von Bhabha-Streuung,
- Untersuchungen zur Messung der Strahlpolarisation,
- Abschätzung des Myon-Untergrundes.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Kernphysik der Staatsuniversität Moskau wurde die Entwicklung des Programms CompHEP weitergeführt und auf einen Teil der oben genannten Prozesse angewandt. Eine neue, auf Helizitätsamplituden beruhende Programmversion bzw. die Integration von über das Standard-Modell hinausgehenden Erweiterungen werden es ermöglichen, kompliziertere Prozesse mit Vorgabe der Polarisation in e^+e^- , γe oder $\gamma\gamma$ Wechselwirkungen zu untersuchen.

Zeuthener Physiker aus den Gruppen H1 und HERMES waren darüber hinaus an der Ausarbeitung von Vorschlägen zur Erweiterung des TESLA Projekts beteiligt.

THERA

Im Projekt THERA wird vorgeschlagen, durch die Kollision von in HERA beschleunigten Protonen mit dem Elektronenstrahl von TESLA tiefunelastische $e p$ Physik im TeV Energiebereich zu ermöglichen. Zur physikalischen Begründung und möglichen Realisierung wurden Studien durchgeführt und Vorträge gehalten. Mit THERA kann die bei HERA begonnene Physik der starken Wechselwirkung bei hohen Partondichten weitergeführt werden.

TESLA-N

Es wird vorgeschlagen, in diesem Festtargetexperiment polarisierte Elektronen im Nord-Arm des Linearbeschleunigers zusammen mit den Positronen für den Kollisionsbetrieb zu beschleunigen. Die Elektronen sollen kurz vor der Kollision durch ein einfaches Magnetsystem vom Hauptstrahl getrennt und auf ein longitudinal oder transversal polarisiertes Target in einer separaten Halle geführt werden. Der Vorteil gegenüber anderen Experimenten bei vergleichbaren Energien ist die um etwa zwei Größenordnungen höhere Luminosität. Wesentliche Ziele des Experiments sind Präzisionsmessungen der x - und Q^2 -Abhängigkeit der noch unbekannt transversalen Spin-Verteilungen des Quarks im Nukleon und die Messung der experimentell bisher kaum bekannten Gluon-Polarisation im Nukleon.

Arbeiten für die TESLA Test Facility und zum FEL

Schwerpunkt der Arbeiten war die Entwicklung der Elektronik für die Strahlage-Monitore im dritten Undulatormodul (auch Wellenleiter-Monitore genannt). Es wurden sowohl die 12 GHz als auch die 1 GHz Elektronikkomponenten einschließlich der I/Q Demodulation für drei Monitore eingebaut und in Betrieb genommen. Danach wurde ein Signal-Rausch-Verhältnis von

20 dB gemessen, ein Wert, der die geforderte Strahlageauflösung von weniger als $20 \mu\text{m}$ nicht gewährleistet. Ursache hierfür war ein zu hohes Rauschen im I/Q Demodulationsbaustein. Folglich musste die 1 GHz-Stufe neu konzipiert, entwickelt und aufgebaut werden, wobei jetzt ein asynchroner Dioden-Demodulator mit elektronisch steuerbarem Dämpfungsglied zum Einsatz kommt. Erste Tests an drei Monitoren zeigten ein Signal-Rausch-Verhältnis von 40 dB und somit eine akzeptable Strahlageauflösung. Gegenwärtig wird für alle Wellenleiter-Monitore die Elektronik installiert, notwendige Softwaretools weiterentwickelt und die Kalibrationskonstanten bestimmt.

Die 12 GHz Cavity-Strahlagemonitore in den Diagnostik-Stationen zwischen den Undulatormodulen wurden getestet. Nachdem ihre Funktionalität im Detail überprüft ist, werden sie mit Hilfe der Wirescanner kalibriert.

Für den „Beam Trajectory Monitor“ (Abb. 86) zur Beobachtung der Lage des Elektronenstrahls im letzten Undulatormodul wurden Montage und Tests der Führungs- und Positioniergenauigkeit abgeschlossen. Anschließend Hochvakuumtests verliefen erfolgreich. Damit wurde die Anwendbarkeit von kostengünstigen Schrumpferbänden in der Vakuumtechnik unterstrichen.

Nach den ersten Betriebserfahrungen mit den Wirescannern in den Diagnostik-Stationen des FEL wurde ein neues Konzept erarbeitet. Eine Prinzipstudie hat gezeigt, dass durch Anwendung eines Kehrgewindespindelantriebs die sehr hohen Anforderungen an den Wirescanner gut erfüllt werden. Im Jahr 2001 wird ein entsprechend modifizierter Prototyp gebaut werden.

Für die zweite Ausbaustufe von TTF-FEL werden drei weitere sogenannte Micromover zur genauen Positionierung der Undulatormodule benötigt. Der Bau dieser Micromover wurde im Frühjahr abgeschlossen. Es wurde eine neue preiswertere und in der Handhabung einfachere Steuerung entwickelt und getestet. Gegenwärtig wird auch untersucht, ob diese Steuerung für den Quadrupolmagneten beim Photoinjektor zum Einsatz kommt.

Vier für die TTF vorgesehene 1.57 GHz Cavity-Monitore wurden gefertigt und zur weiteren Bearbeitung nach Hamburg übergeben. Die hierzu notwendige Elektronik wurde in Zusammenarbeit mit der Technischen

Universität Berlin, Institut für Theoretische Elektrotechnik, aufgebaut und getestet. Wegen der benötigten hohen Stückzahl dieser Elektronikmodule für einen Linear-Collider ist ein neues kostensparendes Konzept für diese Elektronik notwendig. Ein erster Einsatz und Test unter Strahlbedingungen bei der TTF wird im Frühjahr 2001 erfolgen.

Photoinjektor-Teststand

Der Photoinjektor-Teststand in DESY Zeuthen (PITZ) dient der Untersuchung und Optimierung von lasergetriebenen Hochfrequenz-Photoelektronenquellen, wie sie für den Betrieb von Freie-Elektronen Lasern (FEL) und zukünftigen Linearbeschleunigern benötigt werden. Das Projekt wird in Kooperation zwischen DESY, dem Max-Born-Institut, BESSY sowie dem Fachbereich TEMF der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt und wird mit Mitteln aus dem HGF-Vernetzungsfond unterstützt.

Das Ziel ist die Entwicklung von Elektronenquellen mittlerer Ladung (etwa 1 nC pro Elektronenpaket) mit sehr kleiner transversaler Emittanz ($\epsilon_{t,n} \approx 1 \pi \text{ mm mrad}$) und ausreichend kleiner longitudinaler Emittanz (einige 10 keV mm).

Es werden also Elektronenpakete mit sehr großen Phasenraumdichten erzeugt, wobei die Zeitabfolge der Pakete durch den Beschleunigerbetrieb bzw. die Anforderungen der Nutzer des FEL vorgegeben ist. Um dies zu erreichen, sind detaillierte Untersuchungen und Messungen der Prozesse bei der Erzeugung, Beschleunigung und Formung der Elektronenpakete nötig. Ein entsprechend breites Experimentierprogramm ist für den Photoinjektor-Teststand vorgesehen, wobei auch dem Vergleich der Messresultate mit den Ergebnissen von Simulationsrechnungen und theoretischen Abschätzungen ein hoher Stellenwert zukommt.

Beim Betrieb von PITZ können neu entwickelte Komponenten, wie beispielsweise das Lasersystem, die Photokathoden und Elektronenstrahl-Diagnosesysteme, getestet werden. Durch den Aufbau eines vollständigen Photoinjektors kann eine Optimierung aller Teilkomponenten erreicht werden, was infolge des viel-dimensionalen Betriebsparameterraumes eine wichtige Voraussetzung für das Erreichen der ehrgeizigen Ziele ist.

Weiterhin sind Konditionierung und Test von Hochfrequenz-Photoelektronenquellen für den anschließenden Betrieb bei TTF-FEL vorgesehen. Nach dem Einbau einer weiteren Beschleunigungskavität in den Teststand können später auch Untersuchungen zur Erzeugung von „flachen“ Elektronenstrahlen, wie sie beispielsweise für TESLA benötigt werden, durchgeführt werden. Schließlich sind auch Untersuchungen zur Erzeugung von polarisierten Elektronen geplant.

Nachdem im September 1999 beschlossen wurde, den Photoinjektor-Teststand in Zeuthen aufzubauen, begannen nach sechsmonatiger Planungsphase im März 2000 die Bauarbeiten. Es wurden der Beschleunigertunnel, darüber die Halle für die Hochfrequenzversorgung sowie neue Gebäudeteile für die Unterbringung einer neuen Transformatorstation gebaut. Parallel zu diesen Arbeiten wurden bestehende Gebäude für die Einrichtung von Beschleunigerkontrollraum, Streackkamera- und Laserraum, Kühlwasser- und Klimaräumen sowie Elektronikraum umgebaut (siehe Seite 193).

Bis Ende September 2000 konnten die Bauarbeiten weitgehend abgeschlossen werden.

Parallel zum Baufortschritt wurden Elektronik, Software und Mechanik für die Hochfrequenzversorgung und -regelung, die verschiedenen Interlocksysteme, das Vakuumsystem, das Beschleunigerkontrollsystem, das Laserstrahltransportsystem und die Diagnose des Elektronenstrahls teilweise entsprechend den Beispielen an der TTF nachgebaut und teilweise neu entworfen und aufgebaut.

Im August wurde das PITZ-Projekt auf der Konferenz FEL2000 in Durham mit einem Poster vorgestellt.

Im September wurden die Magnete für die Kompensation der Raumladungseffekte des Elektronenstrahls an einem Testaufbau in Hamburg vermessen. In Abbildung 97 ist die gemessene longitudinale Magnetfeldkomponente als Funktion der Strahlposition dargestellt. Das Magnetsystem besteht aus einem Hauptmagneten bei $z \approx 125 \text{ mm}$, welcher den Raumladungseffekten der Elektronenstrahlen entgegenwirkt, und einem Kompensationsmagneten in der rückwärtigen Verlängerung der Strahlrichtung, der das Magnetfeld an der Kathodenposition ($z = 0.0 \text{ mm}$) auf Null drückt.

Im Oktober wurde der in Hamburg bestehende FEL-Gun-Teststand, der in TTF-Betriebspausen mit der dor-

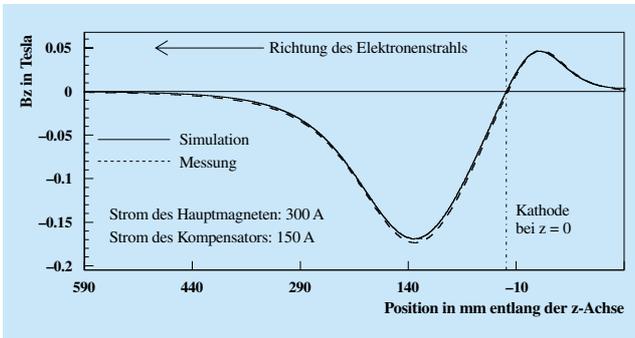


Abbildung 97: Der Verlauf der longitudinalen Magnetfeldkomponente als Funktion der Strahlposition.

tigen Infrastruktur (HF-Versorgung, Magnetnetzgeräte, Wasserkühlung, Photokathodenlaser) betrieben wurde, abgebaut und nach Zeuthen transportiert (Abb. 98).

Von Oktober bis Dezember wurden Klystron, Pulstransformator und Modulator für die Hochfrequenzversorgung von Firmen geliefert und montiert. Nach Aufbau des Lasers und der HF Versorgung kann die sukzessive Inbetriebnahme und Konditionierung aller Komponenten erfolgen. Die Erzeugung erster Photoelektronen ist für die Jahresmitte 2001 vorgesehen.

Experimente Support

Die Dienstleistungen der Gruppe sind in einem breiten Spektrum angesiedelt. Den Projektgruppen werden Serviceleistungen zur Verfügung gestellt wie:

- Betreuung technischer Geräte (Kopierer, Projektoren, Kameras),
- Kopieren, Binden und Bereitstellen von Dokumentationen,
- Verwaltung der Dosimeter,
- Unterstützung bei der Erstellung und Zusammenfassung wissenschaftlicher Berichte (zum Beispiel Proceedings),
- Datenbankarbeiten, Grafik- und Bildbearbeitungen,
- Aktualisierung und Wartung des Fotoarchivs,
- Mitwirkung bei der Umgestaltung der Webseiten,

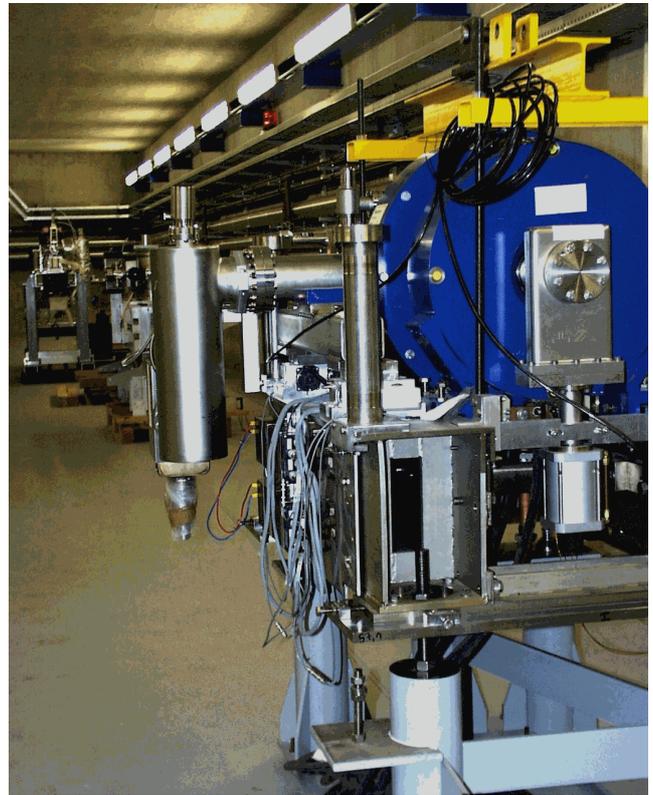


Abbildung 98: Im Vordergrund ist das Gestell des Hochfrequenz-Resonators mit den umgebenden Magneten im neuen Beschleunigertunnel gezeigt. Im Hintergrund sind Teile des Kathodensystems und des Diagnose-Gestells zu erkennen.

- Betreuung der zahlreichen ausländischen Gäste,
- Durchführung von Routinemessungen und Aufarbeitung von Analysedaten.

Immer mehr Bedeutung erhalten die Aktivitäten auf dem Gebiet der Bilderzeugung und -verarbeitung. Das schnelle Ver- bzw. Einarbeiten digitaler Bilder ermöglicht eine gute Dokumentation von Fertigungsprozessen, Baumaßnahmen oder Veranstaltungen. Neben der fotografischen Dokumentation wird aber auch beim Erstellen von wissenschaftlichen Publikationen und von Informationsmaterial, Postern und Plakaten für die Öffentlichkeitsarbeit der Stellenwert der Grafik- und Bildbearbeitung in der Gruppe deutlich. Als weiteres Werkzeug wurde im Berichtszeitraum das Grafikprogramm Freehand eingeführt.

Einen Schwerpunkt der Öffentlichkeitsarbeit stellte die Mitarbeit an der Ausstellung „Reise zum Urknall“ dar, die im Rahmen des Jahres der Physik 2000 im April in der Berliner URANIA stattfand. In Zusammenarbeit mit vielen Wissenschaftlern wurde das Ausstellungskonzept mit Exponaten, Postern, Vorträgen und Führungen realisiert, welches über 15 000 interessierte Besucher in die URANIA nach Berlin brachte.

Außerdem wurden im Berichtsjahr Beiträge zur DESY-EXPO Ausstellung in Hamburg und zur Wissenschaftsausstellung „Sieben Hügel“ im Gropius Bau in Berlin in Form von Texten, Bildern und Exponaten bereitgestellt.

Bei der Internationalen Luft- und Raumfahrtausstellung ILA2000 in Berlin war DESY Zeuthen als größte Forschungseinrichtung des Landkreises Dahme-Spreewald vertreten. Weitere Präsentationen wurden auf dem Brandenburger „Tag der Wissenschaft und Forschung“ im November in Potsdam gezeigt. Mehr als 1500 Schüler nutzten diese Chance, um durch Vorträge und Informationsmaterial mehr über die Hochschul- und Forschungslandschaft in ihrer Umgebung zu erfahren.

Die aktive Arbeit mit und an Schulen zeigte auch in diesem Jahr die Einladung zum „Marie-Curie-Tag“ des

Gymnasiums Ludwigsfelde sowie zahlreiche Besuche von Schülergruppen am Standort Zeuthen. Durch Vorträge und Laborbesichtigungen wurde auch anderen interessierten Gruppen, wie zum Beispiel Studenten der TFH Wildau, der Forschungsbereich der Elementarteilchenphysik näher gebracht. Eine neue Reihe populärer Vorträge wurde im Juli mit „Physik an einem Sommerabend“ gestartet.

Neben dem großen Bereich der Öffentlichkeitsarbeit ist die Organisation von wissenschaftlichen Veranstaltungen eine wichtige Aufgabe. Die Arbeitstreffen von AMANDA, L3Cosmics und Supercomputing wurden ebenso betreut wie die Workshops TESLA-TDR im Februar in Zeuthen, Loops and Legs in Quantum Field Theory im April auf der Bastei in Königsstein/Sachsen und der ECFA-Workshop on High Performance Computing in Lattice Field Theory im Oktober in Zeuthen.

Bei der Durchführung unterstützt die Gruppe die Organisatoren bei der Plakatgestaltung, Planung von Unterkünften und Rahmenprogramm und Information der Teilnehmer sowie Registrierung der Teilnehmer, Erstellung und Pflege von Datenbanken sowie der Dokumentation der Vorträge.