

Abbildung 72: Schematische Ansicht des AMANDA-Detektors.

Forschungsthemen DESY Zeuthen

Experimente bei HERA

Das H1-Experiment

Physikanalyse, Messung des tiefunelastischen ep Streuquerschnitts

Auf dem Lepton-Photon-Symposium in Stanford stellte die H1 Kollaboration eine Präzisionsmessung des inklusiven Elektron-Proton-Streuquerschnitts bei HERA im Bereich von Impulsüberträgen Q^2 zwischen 1 und 150 GeV^2 vor. Mit der erreichten Genauigkeit von 2–3% stellt dieses Ergebnis eine deutliche Verbesserung der bisherigen Messungen des inklusiven Elektron-Proton Streuquerschnitts dar. Diese Daten sind Grundlage für weitere wichtige Resultate, wie der Ausdehnung des Messbereichs zu großen Werten von Bjorken x , der Bestimmung der Gluon-Impulsdichte bei kleinen x Werten (Abb. 73) und einer verbesserten Messung der longitudinalen Strukturfunktion $F_L(x, Q^2)$. Der von Zeuthen entwickelte „Backward Silicon Tracker“ (BST) liefert Daten zur Elektronen-Identifikation, Vertex-Rekonstruktion und Polarwinkelmessung, die für die physikalische Analyse sehr wichtig sind. Die Zeuthener H1-Gruppe hat neben Bau und Betrieb des BST auch wichtige Beiträge zur Analyse und physikalischen Interpretation der Daten geliefert.

Die Silizium-Spurdetektoren BST und FST

Seit dem Jahr 1998 enthält der BST acht Detektorebenen mit je 16 radial segmentierten Sensoren: Die Gesamtzahl der Auslesekanäle beträgt 81 920. Ein wichtiger Meilenstein in der Datennahme mit dem BST war der sogenannte „Minimum Bias Run“ im Dezember des Jahres, mit dem zur Komplettierung der Daten bei kleinen Q^2 etwa 3.5 pb^{-1} Luminosität bei 920 GeV

Proton-Energie aufgezeichnet wurden. Die Effektivität der Detektoren war größer als 90%.

Einer der 16 im ϕ -Winkel segmentierten Sektoren ist seit 1998 mit acht Prototypen eines zweiten Sensortyps bestückt, um Ladung und Impuls der durchgehenden Teilchen zu messen. Diese einseitigen, AC gekoppelten Sensoren wurden im CIS Erfurt hergestellt und haben ein Signal-Rausch-Verhältnis von etwa 24. Die Software für die 3D-Rekonstruktion von Spuren unter Verwendung der Hits in den r und ϕ Sensoren wurde entwickelt.

Eine weitere Komponente des BST sind die Silizium-Pad-Sensoren, mit deren Hilfe ein Trigger zur Selektion von unter kleinen Winkeln gestreuten Elektronen realisiert werden soll. Frühere Messungen hatten ergeben, dass der dafür verwendete Verstärkerchip modifiziert werden muss, um „Common Mode“-Störungen zu unterdrücken. Daher wurde in diesem Jahr die Struktur eines neuen Pad-Readout-Chips entwickelt. Das ASIC Design wurde von der Firma IDEAS (Oslo) durchgeführt. Gefertigt wurde der Chip von AMS (Österreich). Der neue Auslesechip enthält 32 Kanäle mit jeweils einem ladungsempfindlichen Vorverstärker, Impulsformer, Analogausgang, Diskriminator und Ausgangslogik. Die Kanäle können paarweise zur „Common Mode“-Unterdrückung zusammengeschaltet und alle Ausgänge einzeln oder wahlweise logisch verknüpft ausgelesen werden.

Im Zusammenhang mit der Installation von supraleitenden Quadrupolen nahe der Wechselwirkungsregion, die der Erhöhung der Luminosität ab dem Jahr 2001 dienen, muss der BST von acht auf fünf Ebenen verkürzt werden und dem neuen Strahlrohr, das einen elliptischen Querschnitt besitzen wird, angepasst werden. Damit wurde eine weitgehende Überarbeitung des mechanischen und elektrischen Konzepts des BST erforderlich. So wurde die Konstruktion der Kohlefaserträgerstruktur überarbeitet und ein neues Repeaterboard entworfen.

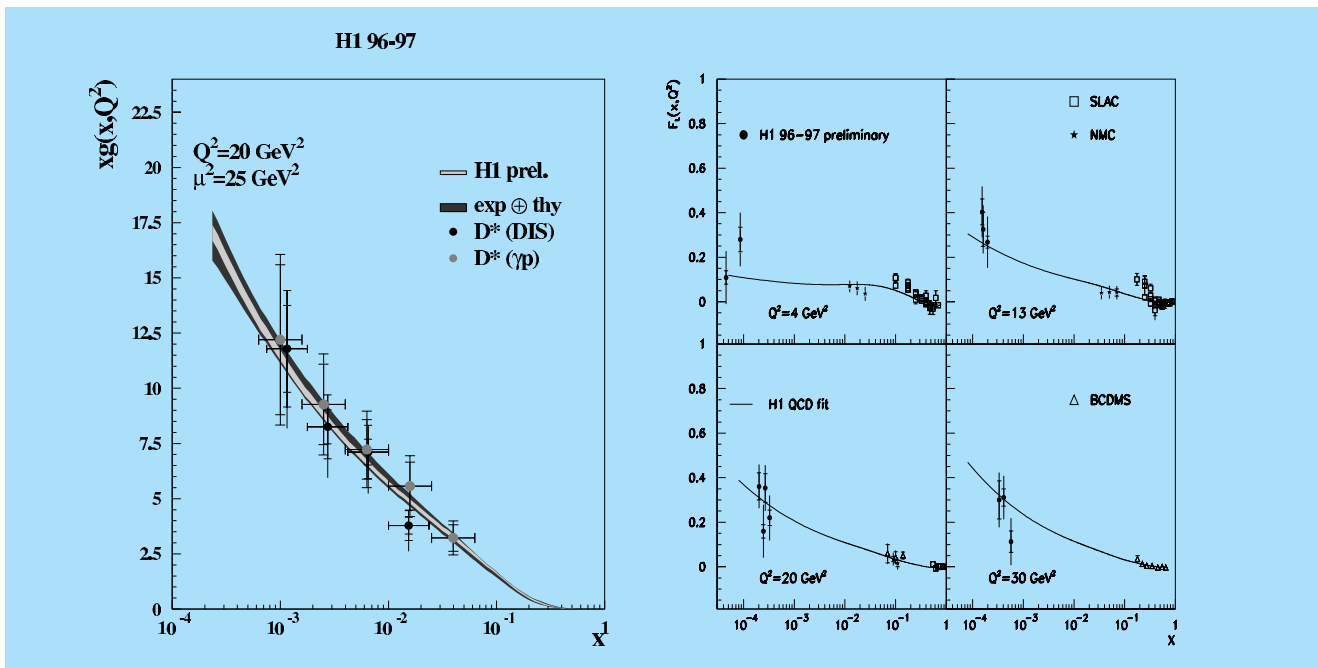


Abbildung 73: Bestimmung der Gluon-Impulsdichte xg (links) und der longitudinalen Strukturfunktion F_L (rechts) in einer Messung des inklusiven tiefunelastischen Streuquerschnitts der H1-Kollaboration.

Anfang 1999 wurde von PRC und Direktorium der Vorschlag zum Bau eines „Forward Silicon Tracker“ (FST) genehmigt. Dieser Detektor wird Daten liefern, die die Spurerkennung und -rekonstruktion bei kleinen Winkeln ($8^\circ < \Theta < 16^\circ$) verbessern wird. Das physikalische Programm dieses Detektors umfasst die Suche nach neuen Teilchen, die Präzisionsmessung des inklusiven Streuquerschnitts bei hohen y und Q^2 und die Untersuchung der Charm-Produktion bei mittleren x -Werten.

Der FST wird wie der BST fünf Sensorebenen haben (Abb. 74). Bei der Realisierung gibt es technische Besonderheiten, da die elektrischen Signale nach vorn, das heißt zwischen dem zentralen und dem vorderen Spurdetektor entlang, herausgeführt werden müssen. Dazu wurde der Prototyp eines Adapterrings entworfen und getestet.

Vorwärts-Proton-Spektrometer

Das Vorwärts-Proton-Spektrometer (FPS) von H1 dient zum Nachweis von Protonen, die unter kleinem Win-

kel relativ zum auslaufenden Protonen-Strahl den Zentraldetektor von H1 verlassen. Das FPS nahm 1999 kontinuierlich Daten mit allen vier Stationen und konnte dabei im Berichtsjahr die bisher größte Anzahl von Ereignissen seit Inbetriebnahme aufzeichnen ($\sim 7.5 \text{ pb}^{-1} / \sim 10.2 \text{ pb}^{-1}$ mit den horizontal / vertikal angeordneten Detektoren). Zur Zeit werden mit diesen Daten systematische Untersuchungen durchgeführt, die physikalische Analyse ist auf Themen wie Messung des Streuquerschnitts der Erzeugung von ρ -Mesonen, Messung der Spindichtematrix und Bestimmung von F_2^{Diff} bei hohen x -Werten gerichtet.

1999 wurde mit den Arbeiten für einen Baugruppenaustausch begonnen. Es ist beabsichtigt, Faserdetektoren und die optoelektronischen Baugruppen auszutauschen, um die Langzeitverfügbarkeit des Detektors zu gewährleisten. Die Verfügbarkeit von Fasern mit höherer Lichtausbeute gestattet Veränderungen bei der Anordnung der Fasern im Detektor („Staggering“), die dazu führen, dass die räumliche Auflösung nicht mehr von der Effektivität abhängt. Bisherige methodische Untersuchungen lassen eine Verbesserung von Effektivität und räumlicher Auflösung bei der Spurrekonstruktion er-

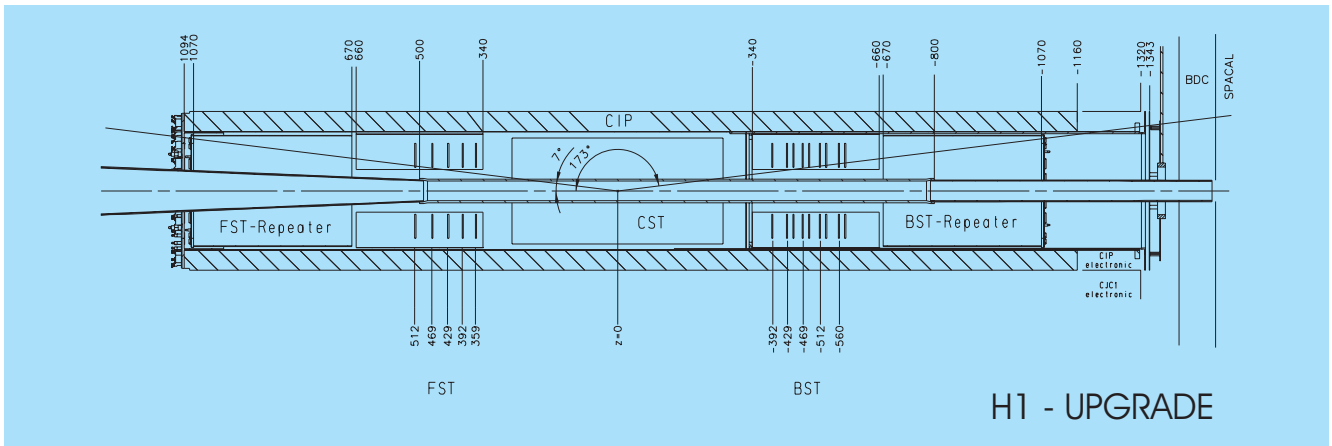


Abbildung 74: *r-z* Ansicht der Siliziumdetektoren BST und FST.

warten. Es ist zunächst geplant, Ende Dezember 1999 einen Prototyp-Detektor zu montieren, um Erfahrungen im Betrieb zu sammeln.

Die Funktionstüchtigkeit der COZ-Driftkammer, die eine Messung der z -Koordinate ermöglicht, wurde auch 1999 durch intensive Betreuung gewährleistet.

Nahezu 107 Monte Carlo-Ereignisse wurden auf der PC-Farm der Gruppe simuliert und rekonstruiert. Diese Farm von zehn Dual Pentium 450 MHz PCs bildete auch die Grundlage für die Analyse der Strukturfunktions-Daten. Der Betrieb dieser Farm erfolgte in Zusammenarbeit mit der DV Gruppe.

Die Hardware-Entwicklungen zum BST und FST erfolgten in Zusammenarbeit mit Kollegen aus Prag, die Erarbeitung der QCD-Analyse der Strukturfunktionen wurde gemeinsam mit Theoretikern aus Zeuthen und Leiden durchgeführt.

Das Experiment HERA-B

Die zentrale physikalische Aufgabenstellung des HERA-B Experiments ist es, Effekte der CP-Verletzung in Teilchensystemen, die Bottom-Quarks enthalten, zu messen. Die Bottom-Mesonen werden in Wechselwirkungen der Protonen des HERA-Protonen-Strahls mit in den Strahl eingeführten Drahttargets erzeugt. Der HERA-B Detektor ist als Vorwärtsspektrometer konzipiert. Der hohe Teilchenfluss stellt extreme Anforderungen an Güte und Performance der verschiedenen

Detektoren und das Trigger- und Datennahmesystem des Experiments. Im Verlauf des Jahres 1999 wurden wesentliche Teile des Experiments fertiggestellt, so dass zum Jahresende 1999 der Detektor weitgehend komplett sein wird (siehe auch Seite 77 ff.)

Die an HERA-B beteiligte Zeuthener Gruppe hat, in enger Zusammenarbeit mit einer Gruppe an der Humboldt-Universität zu Berlin, Aufgaben in vier Bereichen des Experiments übernommen:

- Entwicklung und Bau des äußeren Spurkammerdetektors (OTR) in Kollaboration mit DESY Hamburg, VIK Dubna, NIKHEF Amsterdam, Tsinghua Universität und IHEP Beijing,
- Koordinierung des „Slow Control“-Systems für den HERA-B Detektor,
- Aufbau einer Prozessorfarm (L4) zur schnellen Rekonstruktion und Filterung von Ereignissen im Echtzeitbetrieb,
- Entwicklung von Offline-Software für Rekonstruktion, Simulation und Analyse,
- Ausarbeitung eines Konzepts für die Physikanalyse.

Einen entscheidenden Anteil an der Realisierung der technischen Vorhaben hatten im Berichtsjahr die Infrastruktur-Gruppen DV, E, M und TI. Wichtige Beiträge kamen auch von russischen und chinesischen Gastwissenschaftlern und Technikern.

Äußerer Spurkammerdetektor

Im Berichtsjahr wurden in Zeuthen 186 Driftkammermodule mit insgesamt 28 000 Kanälen für den „Outer Tracker“ (OTR) gebaut. Dies entspricht etwa einem Viertel des gesamten Outer Trackers. Der Anteil an defekten Kanälen betrug nur 0.4%. Es wurden fünf Montagelinien eingerichtet, an denen von Anfang Januar bis Ende August in zwei Schichten produziert wurde. Am Bau und Test der Module waren 25 Techniker und Studenten beteiligt. Alle Module konnten termingerecht nach Hamburg geliefert werden.

Konstruktion: Von der Zeuthener Konstruktion sind auch in diesem Jahr umfangreiche Aufgaben für HERA-B bearbeitet worden, nämlich

- Entwurf der inneren und äußeren Rahmen der OTR-Superlagen im Magneten (MC1, MC3 – MC8),
- Entwurf der Aufhängung der äußeren Rahmen im Magneten,
- Koordination der Konstruktionsaufgaben für die Detektorkomponenten, die im Magneten installiert werden,
- Betreuung und Mitarbeit beim Zusammenbau der inneren und äußeren Rahmen der Magnetkammern,
- Entwurf zusätzlicher Vorrichtungen für die Erhöhung der Fertigungskapazität von Driftkammermodulen und der Verbesserung der Genauigkeit,
- Übernahme von Koordinationsaufgaben bei der Massenproduktion in Zeuthen.

Elektronik: Im Berichtsjahr wurden die Fertigung, das Testen und der Einbau der insgesamt 11 000 ASD8-Verstärkerkarten abgeschlossen. Darüber hinaus wurden Spannungsverteilerkarten, Testpulserkarten und Durchführungsboards gefertigt und installiert. Für das Monitorsystem der Gasversorgung wurden Analogverstärker modifiziert. Für die Signalübertragung zum Triggersystem wurden TTL-zu-LVDS-Wandler entwickelt und gefertigt. Mit dem Einbau der Kammermodule ist während des Berichtsjahres die gesamte Ausleselektronik eingebaut, in Betrieb genommen und in das HERA-B Datennahmesystem integriert worden.

Das im Labor gemessene Rauschverhalten der Verstärker konnte für die installierten Superlagen reproduziert werden.

Slow Control System

Die Zeuthener Arbeitsgruppe hat die Entwicklung von Elektronik und Software zur Kontrolle und Überwachung der äußeren Spurkammern übernommen. In Zusammenarbeit mit dem IHEP und der Tsinghua-Universität in Beijing wurden CAN-Bus steuerbare Spannungsverteiler- und Temperaturmesskarten entwickelt und installiert. Die entsprechende Auslese- und Kontrollsoftware wurde in das Slow Control System von HERA-B integriert. Ein Interlocksystem für die Hochspannung der Spurkammern wurde entwickelt und realisiert. In Zusammenarbeit mit dem ITEP Moskau wurde die zentrale „Slow Control“-Software für alle HERA-B Subdetektoren in Betrieb genommen.

Für das äußere Spurkammersystem ist in den vorhergehenden Jahren die Strahlenbelastbarkeit getestet worden. Diese Untersuchungen waren wichtig bei der Wahl des Kammermaterials und des Driftgases. In Zeuthen werden weiterhin Untersuchungen mit Röntgenstrahlung durchgeführt, mit denen Betriebsparameter wie Gasfluss, Bestrahlungsdichte und Wassergehalt für die Kammern des OTR optimiert werden sollen.

Prozessorfarm

Bei HERA-B wird als letzte Stufe des vierstufigen Trigger- und Datennahmesystems eine Prozessorfarm (L4-Farm) eingesetzt. Ihre Hauptaufgaben sind die Ereignisrekonstruktion, die Klassifikation und Selektion sowie die Bereitstellung der Daten, die für die Überwachung der Datenqualität und für die Kalibrierung der Detektorkomponenten benötigt werden. Die L4-Farm basiert auf kommerziell verfügbaren Standardkomponenten: die Farmknoten sind PCs, die unter dem Betriebssystem LINUX laufen und über Fast Ethernet vernetzt sind. Die Datenübertragung basiert auf dem Internetprotokoll TCP/IP. Die Installation und Inbetriebnahme der Farm mit 200 Prozessoren (Dual-Prozessor PCs) wurde 1999 abgeschlossen.

Die Software für die Verteilung der Ereignisse vom Datennahmesystem zu den Farmknoten und zur Archivierung ist betriebsbereit. Die Software zum Reprozessieren von Ereignisdaten wurde entwickelt und in Betrieb genommen. Während der diesjährigen Bestrahlungsperiode wurde eine Datenmenge von etwa 7 TB auf Band gespeichert, wobei die L4-Farm sich als letzter Teil des Datennahme- und Triggersystems bewährt hat. Die Designwerte für die Datenraten zur Farm (50 Hz, 5 MB/sec) und von der Farm zum Archiv (20 Hz, 2 MB/sec) wurden erreicht.

Das bei HERA-B eingesetzte Programm ARTE zur Verwaltung der Datenstrukturen läuft standardmäßig auf den Farmknoten und es gibt erste Erfahrungen mit der aktuellen Rekonstruktions-Software. Zur Überwachung der Datenqualität, der Kalibrierung und des Alignments werden auf jedem Knoten Histogramme gefüllt und stehen für weitere Analysen zur Verfügung.

Software

Der Programmcode für die Simulation des HERA-B-Detektors wird in Zeuthen verwaltet und weiterentwickelt. Die Aktivitäten waren im Berichtsjahr besonders auf Verbesserungen bei der Digitalisierung, dem Benutzerzugriff und der einheitlichen Behandlung der Subdetektoren gerichtet. Für die verschiedenen Detektorversionen, mit denen 1999 Daten genommen wurden, wurden die Geometriedaten bereitgestellt.

Mit Inbetriebnahme der ersten Superlagen des äußeren Spurkammersystems im Detektor wurde eine Überprüfung der Spurrekonstruktion anhand von Daten möglich. Dabei gelang die Rekonstruktion von Teilchenspuren auch mit dem noch unvollständigen Detektor und ohne optimierte Kalibrierungs- und Alignment-Korrekturen. Die Funktionsfähigkeit wesentlicher Programmteile (Mustererkennung in den PC-Kammern, Spurpropagation durch das inhomogene Magnetfeld und durch den RICH, Spurfit) wurde nachgewiesen (Abb. 75). Mit den im Tracker gefundenen Spuren war auch die Synchronisation mit anderen Detektorkomponenten (VDS, RICH, ECAL, Myon-System) möglich. Mit den rekonstruierten Spuren konnten die für das Alignment eingesetzten Algorithmen an Daten getestet werden.

Parallel dazu wurden die Arbeiten zur Integration der verschiedenen Rekonstruktions-Algorithmen in ein einheitliches Rekonstruktions-Programm fortgesetzt. Es existiert nun ein Programmpaket, das alle wesentlichen Rekonstruktionsmodule – Spurfinding in Vertexdetektor und Hauptspurkammersystem, Kalorimetercluster, globaler Fit, Elektron-, Myon- und Hadron-Identifizierung – vernetzt. Gleichzeitig wurden Werkzeuge zur Steuerung von Ereignisgeneration, Detektorsimulation und Rekonstruktion entwickelt, mit denen sich Monte Carlo-Massenproduktion effizient verteilt an mehreren Standorten durchführen lässt.

Analyse

Im Berichtsjahr konnte die erste Fassung eines C++ basierten Analysepakets fertiggestellt werden, das einen sehr kompakten und strukturierten Analyse-Code erlaubt und innerhalb der „ROOT“-Benutzerumgebung eine schnelle interaktive Analyse ermöglicht.

Das HERMES Experiment

Experimentierbetrieb

Während der Datennahme gewährleisteten Mitarbeiter der Gruppe den Betrieb und die Funktionalität von Detektorkomponenten (Driftkammern, Photon-Detektoren des RICH Detektors und Tuning-Szintillatoren). Darüber hinaus wurde auch Verantwortung für das Gesamtexperiment übernommen, so erfolgte die Koordination des Experimentier-Betriebes für etwa drei Monate durch Zeuthener Physiker.

Programmentwicklung

In Zeuthen wurden wesentliche Bestandteile der Analyse-Software für den RICH-Detektor entwickelt und für den Routinebetrieb im Experiment vorbereitet. In einer detaillierten Studie konnte nachgewiesen werden, dass der zunächst vorgesehene Austausch des Spiegelsystems keine merkliche Verbesserung für

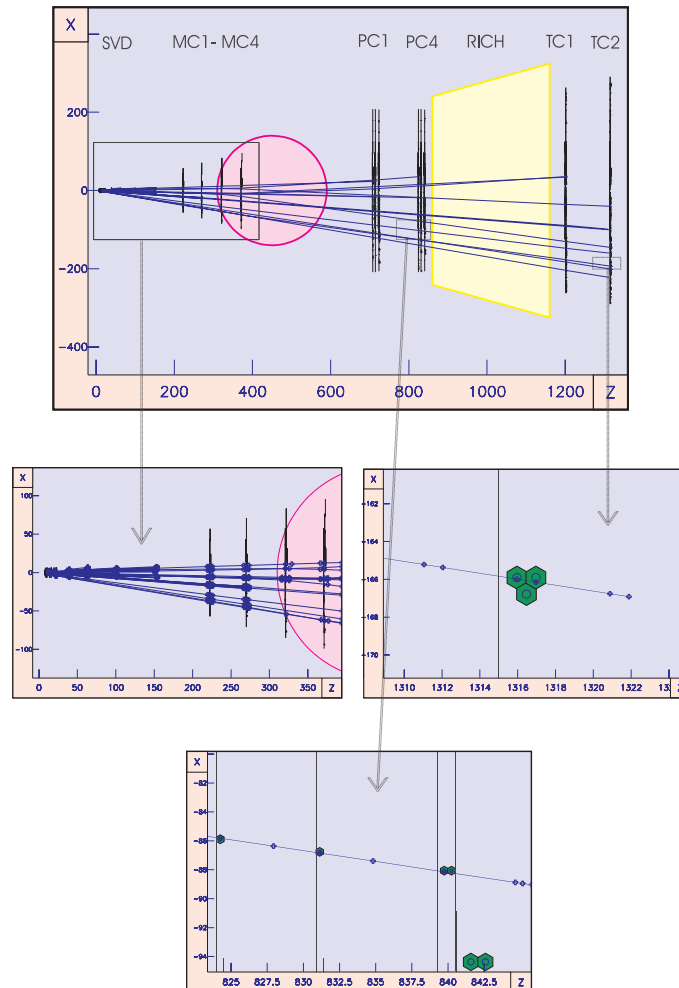


Abbildung 75: Spurrekonstruktion im Outer Tracker. Das obere Bild zeigt die Gesamtansicht vom Wechselwirkungspunkt bis zur letzten Spurkammerebene TC2. Die anderen Ansichten sind vergrößerte Ausschnitte: im Silizium-Vertexdetektor und in den Kammern MC1–MC4 (mitte links), Spuren in den hexagonalen Zellen von TC2 und PC4 (mitte rechts und unten).

die Rekonstruktion der physikalischen Daten erbringen würde. Im Ergebnis konnten damit beträchtliche Aufwendungen eingespart werden. Die Anwendung eines im Rahmen einer Diplomarbeit erarbeiteten Verfahrens zum Alignment des Spiegelsystems ermöglichte eine signifikante Verbesserung der Einzelphoton-Auflösung, die jetzt weniger als 10% von den Simulationen für einen idealen Spiegel abweicht. Die Qualität der Spiegel-Fokussierung wird in Abbildung 76 demonstriert.

Physikalanalyse

Es wurde eine vollständige Analyse der polarisierten Proton-Strukturfunktion g_1 in einem neuen kinematischen Bereich ($x_{\min} \sim 0.004$) durchgeführt. Die für diese Studie notwendigen umfangreichen systematischen Untersuchungen führten zu neuen Erkenntnissen über das Alignment der Detektorhälften und über die Größe verschiedener systematischer Effekte.

Bei der Analyse von Pion-Paaren mit hohem Transversalimpuls gelang eine direkte Messung des Vorzeichens der Polarisation der Gluonen ($\Delta G/G > 0$) im longitudinal polarisierten Nukleon.

Bei der Untersuchung der Erzeugung von ρ -Mesonen wurde erstmals die Doppel-Spin-Asymmetrie der ρ -Mesonen gemessen (siehe Seite 70).

An der Ausarbeitung des Physikprogramms des HERMES-Experiments für die Jahre 2001–2006 waren Physiker der Gruppe aktiv beteiligt. Ein zentraler Punkt des Programms ist die Durchführung von Messungen mit einem transversal polarisierten Target, welche die Bestimmung der bisher unbekanntenen Transversalitäts-Verteilung des up-Quarks ermöglichen werden.

Im April 1999 wurde in Zeuthen ein Internationaler Workshop „Physik mit transversal polarisierten Targets“ durchgeführt.

Das ZEUS-Experiment

Die Mitglieder der Zeuthener Gruppe im ZEUS-Experiment haben im Jahr 1999 an verschiedenen physikalischen und an methodischen Fragen gearbeitet. Zur Entwicklung und Produktion des Mikro-Vertex-Detektors (MVD), einer zentralen ZEUS-Komponente nach der Luminositätssteigerung, wurden wichtige Beiträge geleistet.

Ein Mitglied der Gruppe ist seit dem Sommer 1998 „Physics Chairman“ des ZEUS-Experiments.

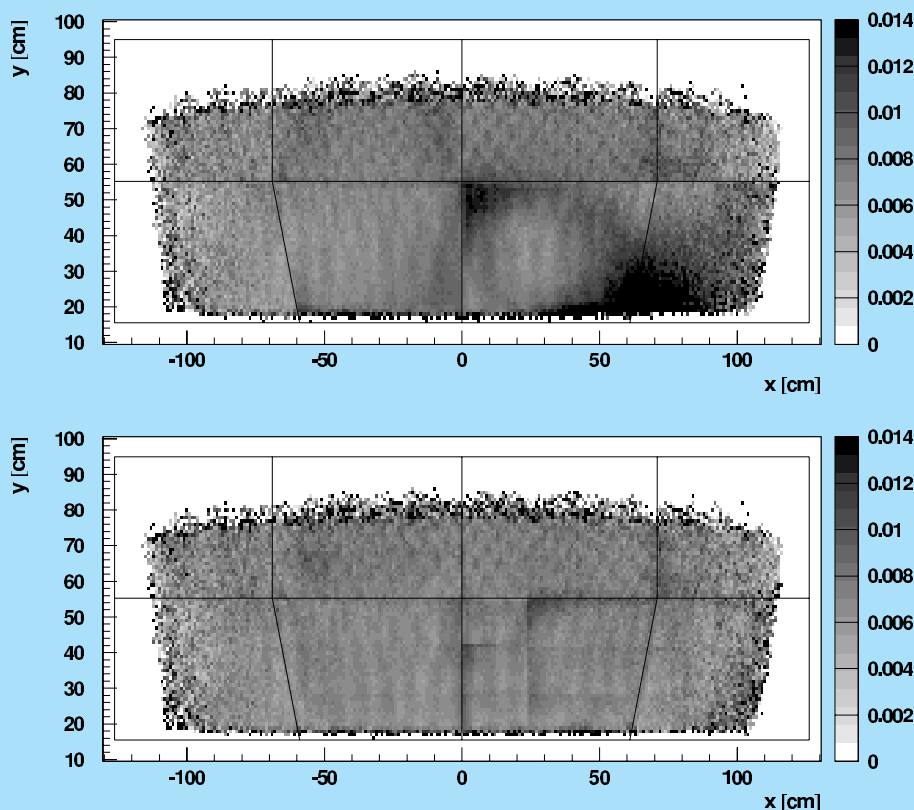


Abbildung 76: Die Genauigkeit der Spiegel-Fokussierung vor (oben) und nach der Software-Korrektur (unten). Die dunklen Stellen im oberen Bild zeigen, wo eine Abbildung durch den Spiegel verzerrt wird.

Physikanalyse

Informationen zu Daten-Qualität und Luminosität der Datennahme wurden gesammelt und aktuell im World Wide Web präsentiert.

In Zeuthen wurde aktiv an der Suche nach supersymmetrischen Teilchen in den ZEUS-Daten mitgearbeitet. Hierzu wurden Ereignisse mit verschiedenen Topologien von Jets und Leptonen im Endzustand analysiert und die Ergebnisse im Rahmen von SUGRA („Supergravity“-)Modellen diskutiert.

Detektorbau und methodische Untersuchungen

Es wurde an Methoden zur Rekonstruktion des Energieverlustes von Teilchen im inaktiven Material mit dem Presampler-Detektor gearbeitet, der von der Zeuthener Gruppe betreut wird. Neue Korrekturfunktionen, die auf Daten der tiefunelastischen Streuung beruhen, wurden für diesen Detektor und einen kleinen Szintillator-Streifen-Detektor vor dem Rückwärts-Kalorimeter ausgearbeitet. Es wurden Korrekturen für verschiedene Detektorbereiche gefunden, die die Auflösung verbessern. Verbesserte Kriterien für die Auswahl des tiefunelastisch gestreuten Elektrons wurden vorgeschlagen und getestet.

Eine andere methodische Studie befasste sich mit dem Ansprechverhalten des zentralen Kalorimeters gegenüber Elektronen. Hierbei wurde eine Reihe wichtiger Resultate erzielt: die Genauigkeit der Energieskala konnte weiter verbessert werden, die Position des Kalorimeters wurde sehr präzise vermessen und das Verhalten der Elektronen in den Zwischenräumen der Kalorimeter-Zellen konnte besser verstanden werden.

Der Aufbau der Produktionsstätte in Zeuthen für die Herstellung der ZEUS-Mikro-Vertex-Module wurde fortgesetzt. Diese Aktivitäten wurden sehr stark durch Mitarbeiter aus den technischen Gruppen unterstützt. Es erfolgte zusätzlich zu den organisatorischen Arbeiten die Entwicklung der Programmsteuerung der Schrittmotoren des Dioden-Klebetisches sowie der dazugehörigen Auslese des Mikrometer-Messstabes.

Parallel hierzu wurde ein Testmessplatz aufgebaut. Die im Herbst 1998 durchgeführten Untersuchungen an Teststrukturen zur Überprüfung relevanter Prozessparameter in der Dioden-Produktion werden weitergeführt und sollen erweitert werden. Diese Messungen sind für das Verständnis des Langzeitverhaltens von Bedeutung.

Weiterhin besteht Verantwortlichkeit für die Qualitätskontrollen. Aufgaben, die in der alleinigen Verantwortung der ZEUS-Gruppe in Zeuthen liegen, sind das Präzisionsschneiden der Auslese-Folien sowie das Verkleben dieser Folien mit den Silizium-Dioden.

Die Platten, in denen die Halbmodule fixiert sind, wurden in Zeuthen entworfen und produziert. Es wurde eine Datenbank entwickelt, die es den am Projekt Beteiligten ermöglichen wird, sich über wesentliche Merkmale der Siliziumdetektoren bezüglich ihrer Qualität und logistischen Information zu informieren. Die Verwaltung aller für die Dioden gemessenen Kennlinien sowie die Extraktion und Übernahme der für die Datenbank wichtigen Größen ist abgeschlossen.

Neben den Tätigkeiten, die direkt im Zusammenhang mit der Produktion der ZEUS-MVD-Halbmodule stehen, wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg Untersuchungen zur Strahlenfestigkeit der Silizium-Dioden durchgeführt.

Das L3-Experiment am CERN

L3 ist eins der vier Experimente am Speicherring LEP bei CERN. 50 Institute aus europäischen Ländern, China, Indien und den USA beteiligen sich daran. Der L3-Detektor ist seit 1989 in Betrieb. Er wurde mehrmals durch neue oder verbesserte Detektorkomponenten ergänzt.

In den Jahren 1998 und 1999 wurden für das Projekt L3COSMIC großflächige Szintillatoren zur Messung von Myonen aus der kosmischen Strahlung installiert.

Im Jahr 1999 wurden mehrere Rekorde aufgestellt, so gelang es, die Strahlenergie bei LEP schrittweise auf bisher unerreichte 102 GeV zu erhöhen. Die integrierte Luminosität betrug 250 pb^{-1} , das entspricht etwa 25 000 e^+e^- -Annihilationen pro Experiment und

ist die bisher höchste bei LEP erreichte Luminosität. Die Datennahme beim L3-Experiment war sehr effizient, so dass etwa 91% der Ereignisse für die Auswertung aufgezeichnet werden konnten.

Physikanalysen der Zeuthener Arbeitsgruppe

Beherrschende Themen waren die Suche nach Higgs-Bosonen, nach SUSY-Teilchen und nach neuen Austauscheteilchen bei der Fermion-Paar-Produktion.

Die Suche nach Higgs-Bosonen erfolgte mit drei unterschiedlichen Annahmen über die Struktur des Higgs-Sektors:

- Ein Higgs-Dublett mit einem neutralen Higgs-Boson (Standard-Modell),
- zwei Higgs-Dubletts in der minimalen supersymmetrischen Erweiterung des Standard-Modells (MSSM) mit zwei leichten neutralen Higgs-Bosonen,
- allgemeine Zwei-Dublett-Modelle mit auch paarweiser Erzeugung von geladenen Higgs-Bosonen.

Die Suche erfolgte in allen Endzuständen, die bei der gegebenen Schwerpunktsenergie möglich sind. Für keines der Higgs-Modelle wurden Signale gefunden, die eindeutig die Existenz dieser Teilchen beweisen. Abbildung 77 zeigt die Massenverteilung aller Ereignisse, die aus den Daten des Jahres 1999 als Standard-Modell Higgs-Kandidaten selektiert wurden. Dazu werden die effektiven Zwei-Fermion-Massen aus den Endzuständen $Z + ff$ kombiniert entsprechend der Reaktion $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow 4f$. Aus dem Fehlen eindeutiger Nachweise für Higgs-Bosonen konnten untere Grenzen für ihre Massen ermittelt werden: Die Higgs-Masse im Standard-Modell ist $m_H > 101$ GeV, im MSSM $m_H > 81$ GeV und $m_A > 82$ GeV und im allgemeinen Zwei-Dublett-Modell $m_H > 65.5$ GeV.

Bei der Selektion von potentiellen Higgs-Ereignissen findet man vor allem Ereignisse der Art $e^+e^- \rightarrow ZZ$, die der Higgs-Strahlung sehr ähnlich sind. Sie sind von

Interesse bei der Suche nach anomalen γZZ - und ZZZ -Kopplungen, deren Existenz im Standard-Modell nicht erlaubt ist. Die Messungen zeigen, dass die Zahl der vom Standard-Modell vorhergesagten ZZ -Ereignisse sehr gut mit dem Messwert übereinstimmt.

Die direkte Suche nach den supersymmetrischen Partnern der Fermionen der dritten Generation, dem skalaren Top (stop), dem skalaren Bottom (sbottom) sowie dem skalaren Tau (stau), in den Daten bei hohen Energien war bisher negativ. Neue untere Massengrenzen für das stop, sbottom und erstmals auch für das stau im MSSM bei maximalem Wirkungsquerschnitt sind $M_{\text{stop}} > 92$ GeV, $M_{\text{sbottom}} > 90$ GeV und $M_{\text{stau}} > 74$ GeV. Die Suche nach skalaren Quarks wurde auch auf die erste und zweite Generation erweitert. Darüber hinaus wurden indirekte Grenzen für Gluino-Massen (das Gluino ist der SUSY-Partner des Gluons) abgeleitet. Die von der Suche nach Charginos, Neutralinos und skalaren Leptonen ermittelte Grenze für die allgemeine Gaugino-Masse M_2 kann in eine Grenze für die Gluino-Masse transformiert werden. Unter der Annahme, dass der SUSY Parameter $\tan \beta = 4$ ist, ergibt sich der Wert $M_g > 210\text{--}250$ GeV. Damit ver-

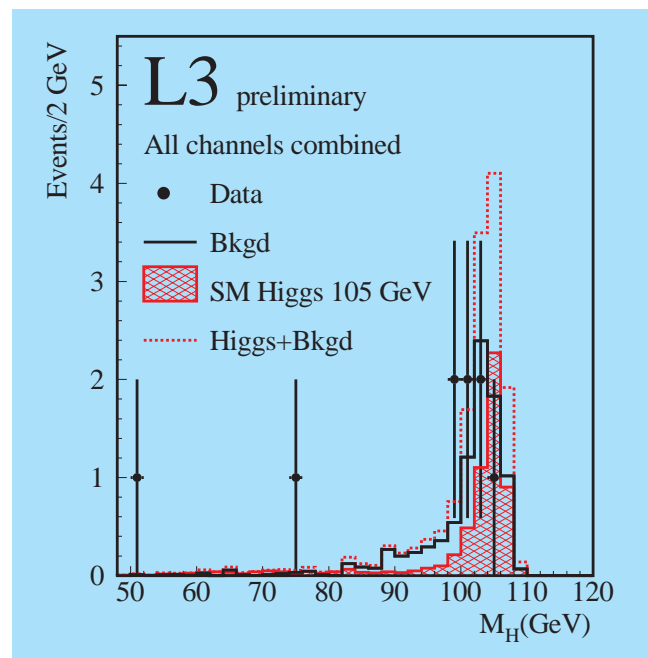


Abbildung 77: Verteilung der effektiven Zwei-Fermionen-Masse. Dabei wurde über die Endzustände $Z + ff$ summiert.

fügt das L3-Experiment über das bisher vollständigste Ergebnis der Suche nach supersymmetrischen, stark wechselwirkenden Teilchen.

Neue Prozesse, die virtuell an der Fermion-Paar-Produktion beteiligt sein könnten, beschreibt man allgemein durch Vier-Fermion-Kontaktwechselwirkungen. Die Analysen ergeben, dass neue Wechselwirkungen – je nach Modell – erst oberhalb einer Energieskala von 2–14 TeV auftreten könnten. Diese Energieskala kann durch spezielle Teilchen, zum Beispiel weitere neutrale Eichbosonen, Leptoquarks oder R-Paritäts-verletzende skalare Teilchen, interpretiert werden. Für deren Massen bzw. Kopplungen können untere bzw. obere Grenzen ermittelt werden. Aufgrund der hohen Luminosität waren 1999 erstmals Messungen der Wirkungsquerschnitte der Fermion-Paar-Produktion mit Genauigkeiten im Prozentbereich möglich. Um den Vergleich der Messergebnisse mit den Vorhersagen des Standard-Modells sowie die Interpretation durch neue Modelle mit adäquater Genauigkeit durchführen zu können, mussten die Analyse-Programme in Zusammenarbeit mit den Theoretikern verbessert werden. Dies ist auch im Hinblick auf das Physikprogramm eines künftigen e^+e^- -Linearbeschleunigers von großer Bedeutung.

L3COSMIC

Das L3COSMIC-Projekt hat das Ziel, unter Nutzung des Myon-Spektrometers des L3-Experiments das Spektrum atmosphärischer Myonen im Energiebereich von einigen GeV bis 1 TeV zu messen.

An dem Experiment sind Gruppen von IHEP Beijing, ETH Zürich, NIKHEF Amsterdam, Universität Nijmegen, Humboldt-Universität zu Berlin, CIEMAT Madrid, University of Michigan und DESY Zeuthen beteiligt. In der Winterpause 1998/99 von LEP wurde die komplette Phase 2 des Experiments installiert, das heißt es ist der gesamte obere Teil des L3-Magneten mit Szintillationszählern abgedeckt und es werden alle acht Oktanten des Myon-Spektrometers ausgelesen. Bei einer Triggerrate von etwa 450 Hz und einer Totzeit der gesamten Auslese von weniger als zwei Prozent wurden im Berichtsjahr etwa $5 \cdot 10^9$ Trigger (~ 5.5 TByte) registriert und auf Band gespeichert. Die Analyserechnungen wurden auf einer PC-Farm mit zur Zeit 40 Prozessoren im CERN

durchgeführt. Die Zeuthener Gruppe konzentrierte sich auf folgende Themen:

- Erweiterung der Ausleseelektronik für alle 34 Module des Szintillatorsystems,
- Einbindung des Szintillatorsystems in das DAQ-System und Betreuung während der Datennahme und Weiterentwicklung der Offline-Software (Effektivitäten, Zeitkalibrierung des Szintillatorsystems),
- Entwicklung von Software zur Datenanalyse und Mitarbeit an der Datenanalyse zur Bestimmung des Spektrums der Myonen.

Erste Ergebnisse werden in einigen Monaten verfügbar sein.

Fast Tracker and Trigger – FTT

Die Gruppe FTT hat in den vergangenen Jahren verschiedene methodische Arbeiten zum Einsatz von Szintillationsfaser-Detektoren durchgeführt. Die wesentlichen Aktivitäten im Berichtszeitraum waren:

Arbeiten zur Strahlenhärte von Faserdetektoren

Im November 1998 wurde ein Faserdetektor-Prototyp in einem intensiven π -Meson Strahl des PSI in Villigen (Schweiz) mit einer Gesamtdosis von 10–40 kGy bestrahlt. Es wurde kein signifikanter Strahlenschaden beobachtet, in Übereinstimmung mit Messungen an einzelnen Faserproben, die zuvor im Hahn-Meitner-Institut in Berlin durchgeführt wurden.

Studien zum Einsatz von Avalanche-Photodioden

Ziel dieser methodischen Untersuchungen ist es, Lösungen für das Auslesen von Spurdetektoren aus szintillierenden Fasern zu finden, die Vorteile gegenüber der Standardlösung mit Photovervielfachern aufweisen. Es wurden kommerzielle Seriengeräte und Prototypen von

Avalanche-Photodioden und MRS-Dioden (Metal Resistive Semiconductors) im Labor und am Teststrahl in einem weiten Temperaturbereich bei unterschiedlichen Betriebsmodi (Geigermodus und Lawinenmodus) untersucht. Die besten Ergebnisse wurden mit einem Prototyp von Hamamatsu (95% Effektivität im blauen Spektralbereich bei Raumtemperatur) erhalten. Die Arbeiten fanden in Kooperation mit Dubna, der Humboldt-Universität zu Berlin und der Fachhochschule Köln statt.

Die Gruppe FTT war in der Vergangenheit maßgeblich an der Entwicklung und Installation der FPS- und L3COSMIC-Detektoren (siehe S. 146 und S. 154) beteiligt. Mitglieder der Gruppe haben im Berichtszeitraum aktiv am Detektorbetrieb und an der Datenanalyse teilgenommen.

Neutrino-Astrophysik

Die Zeuthener Neutrino-Astrophysik Gruppe beteiligt sich an zwei Projekten, die den Bau eines Teleskops für hochenergetische Neutrinos aus kosmischen Beschleunigungsprozessen zum Ziel haben. Der Schwerpunkt der Aktivitäten liegt auf dem AMANDA-Projekt am Südpol. Daneben trägt die Gruppe zum Betrieb des NT-200-Teleskops im sibirischen Baikalsee bei und beteiligt sich an der Datenanalyse.

Das Prinzip dieser Teleskope besteht darin, die sekundären Teilchen, die bei einer Neutrino-Reaktion entstehen, über das von ihnen im Wasser bzw. Eis emittierte Cherenkov-Licht nachzuweisen. Das Licht wird durch Photovervielfacher registriert, die in druckfesten Glaskugeln montiert und in großer Tiefe angeordnet werden. Aus den Ankunftszeiten und den Amplituden des Lichts wird die Bahn des in der Neutrino-Reaktion erzeugten und den Detektor durchquerenden Sekundärteilchens berechnet. Das Experiment benutzt die Erde als Filter. Damit wird auch die Bestimmung der Teilchen-Signatur möglich: aufwärtslaufende, den Detektor von unten nach oben durchquerende Teilchen sind Neutrino-induzierte Myonen.

Anfang Oktober fand in Zeuthen ein Arbeitstreffen von Vertretern des BMBF und Wissenschaftlern zur Zukunft der Astroteilchenphysik statt, an dessen Vorbereitung

und Durchführung sich die Zeuthener Neutrino-Gruppe beteiligte.

Das Südpol-Projekt AMANDA

Seit 1994 beteiligt sich DESY Zeuthen an AMANDA („Antarctic Myon and Neutrino Detector Array“). AMANDA nutzt den knapp 3 km dicken Eispanzer über dem geografischen Südpol als Detektormedium. Logistische Grundlage des Experiments ist die US-amerikanische Amundsen-Scott-Station.

AMANDA ist eine Kollaboration von amerikanischen, schwedischen und belgischen Universitäten sowie der Universität Mainz, der Gesamthochschule Wuppertal (seit 1999) und DESY.

Der Detektor (Abb. 72) besitzt eine Zylindergeometrie. Zehn Strings mit 302 optischen Modulen sind in einer Tiefe von 1.5 km bis 2 km angeordnet (AMANDA-B10), drei weitere instrumentierte Strings beginnen in einer Tiefe von 1.2 km und reichen bis 2.3 km Tiefe. In der Saison 1999/2000 wird mit dem Deployment weiterer Strings der AMANDA II-Detektor fertiggestellt werden.

Im Jahr 1999 konzentrierte sich die Analyse auf die Daten, die 1997 mit dem aus zehn Strings bestehenden Prototyp-Detektor B10 gewonnen wurden. Im Folgenden werden vor allem die in Zeuthen erzielten Ergebnisse beschrieben.

Atmosphärische Neutrinos

Das „Experimentum Crucis“ für ein Neutrino-Teleskop ist die klare Separation von aufwärtslaufenden Myonen aus Wechselwirkungen atmosphärischer Neutrinos. Die Neutrinos entstehen in Wechselwirkungen der Teilchen der kosmischen Primärstrahlung in der Erdatmosphäre. Die Erzeugungsspektren dieser Neutrinos (Winkel, Energie) sind bekannt. Die Messung der Myonen gestattet somit die Eichung des Detektors. Aus den 109 Ereignissen, die der B10-Detektor 1997 über 170 Tage registriert hat, sind inzwischen Neutrino-Kandidaten herausgefiltert worden. Abbildung 78 zeigt die um den Nordpol zentrierte Himmelskarte aller 116

Neutrino-Kandidaten. Die Winkelverteilung ist kompatibel mit der Erwartung für atmosphärische Neutrinos. Da der B10-Detektor relativ „dünn“ war (Höhe 400 m, Durchmesser aber nur 120 m), ist die Rekonstruktion nahe dem Horizont problematisch. Die Akzeptanzkriterien schneiden daher Neutrino-Ereignisse oberhalb 70° weitestgehend weg.

Suche nach Elektron-Neutrino Schauern

Es wurden Ereignisse mit der Signatur isolierter, aufwärts gerichteter Schauer innerhalb des Detektors selektiert. Solche Schauer werden unter anderem bei der Reaktion von Elektron-Neutrinos erzeugt. Da alle Kandidaten für aufwärtsgerichtete Schauer eine relativ niedrige Multiplizität (Anzahl der getroffenen Photomultiplier) hatten, ließ sich eine obere Grenze von $10^{-16} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ für den diffusen Fluss von hochenergetischen Elektron-Neutrinos mit Energien zwischen 1 und 100 TeV angeben. Dieser Wert ist vergleichbar mit der im Baikal-Experiment gewonnenen oberen Grenze. Beide Werte unterbieten die bisherigen besten experimentellen Obergrenzen, liegen aber noch fast eine Größenordnung über den Grenzen, die sich mit Hilfe von Modellrechnungen aus Satellitenbeob-

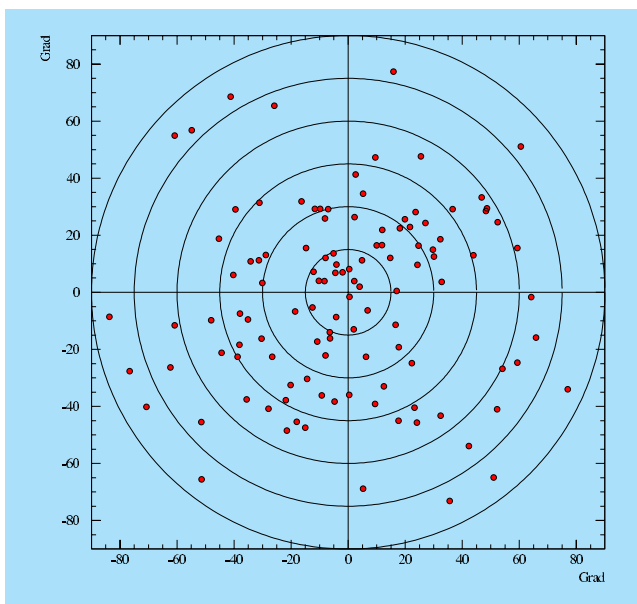


Abbildung 78: Himmelskarte der selektierten Neutrinokandidaten.

achtungen des diffusen Photon-Hintergrundes ableiten lassen.

Magnetische Monopole

Monopole, die sich in Wasser oder Eis mit einer Relativgeschwindigkeit $\beta = v/c > 0.7$ bewegen, senden Cherenkov-Licht aus, aufgrund ihrer magnetischen Ladung etwa 8300 mal soviel wie Myonen. Das BAIKAL- wie das AMANDA-Experiment haben nach solchen sehr hellen Spuren gesucht und in beiden Fällen aus der Nichtbeobachtung obere Grenzen für den Monopol-Fluss abgeleitet. Der AMANDA-Wert von $10^{-16} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ für $\beta \approx 1$ stellt die gegenwärtige beste Grenze dar (Abb. 79).

Supernova-Suche

Erhöhungen der Photomultiplier-Rauschraten über einige Sekunden könnten durch viele niederenergeti-

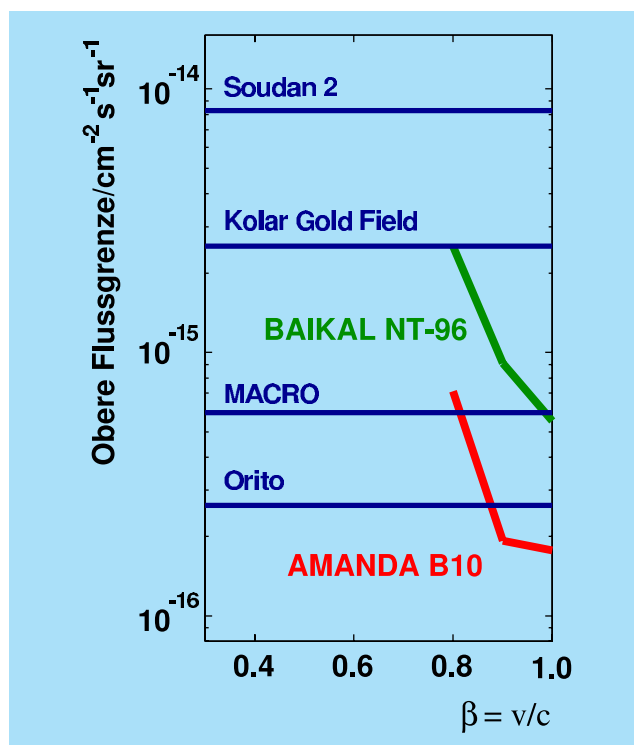


Abbildung 79: Grenzwerte für Monopole.

sche Neutrino-Reaktionen infolge einer Supernova-Explosion hervorgerufen werden. Der AMANDA-Detektor kann wegen des Fehlens optischer Störsignale im Eis auch kleine Änderungen der Raten registrieren. Obwohl keines dieser MeV-Einzelereignisse den Gesamtdetektor mit seiner Energieschwelle von 50 GeV triggern würde, bliebe eine kurzzeitige Veränderung der Rauschraten nicht unbemerkt. Mit seiner gegenwärtigen Sensitivität ist der AMANDA-Detektor für Supernovae-Explosionen in Entfernungen bis zu 8.8 Kiloparsec empfindlich. Mit den vorliegenden Daten kann in Übereinstimmung mit anderen Teleskopen eine Supernova-Explosion innerhalb der letzten zweieinhalb Jahre ausgeschlossen werden.

Variationen der Triggerrate mit der Temperatur

Die Rate der durch Luftschauer oberhalb des Detektors erzeugten und bis in die Tiefe herabdringenden Myonen hängt von der über die gesamte Dicke der Atmosphäre integrierten Temperatur ab. Der erhaltene Wert des Korrelationsparameters $\alpha = 0.86 \pm 0.05$ zwischen Temperaturänderung $\Delta T/T$ und Triggerrate $\Delta R/R$ bestätigt Messungen an anderen Orten der Welt und zeigt, dass die Funktion des 1997er Detektors bis auf Prozentgenauigkeit verstanden ist.

In der Pol-Saison 1999/2000 soll der gegenwärtige 13-String-Detektor mit sechs weiteren Strings zu AMANDA-II komplettiert werden. AMANDA-II soll mit einer effektiven Fläche von etwa 30 000 m² Daten nehmen, ehe in einigen Jahren möglicherweise ein Ausbau auf einen Quadratkilometer (IceCube) beginnen kann. Die Zeuthener Gruppe liefert dazu folgende Beiträge:

- Eine spannungsgesteuerte HV-Versorgung, die direkt am Photovervielfacher angebracht ist.
- Das Elektronik-Board für den digital gesteuerten Analogen Optischen Modul (dAOM), bei dem das Anodensignal analog, elektrisch und optisch über eine Leuchtdiode, an die Oberfläche übertragen wird, Spannung, Verstärkung und Vorstrom für die

Lichtdiode aber digital über einen Mikroprozessor im optischen Modul geregelt werden können. Auch die dazugehörige Steuerung von der Oberfläche wurde in DESY gebaut.

- Die Datennahme-Elektronik für den Digitalen Optischen Modul (DOM). Hierbei wird zusätzlich zu den Steuerfunktionen des dAOM die Wellenform unter Eis mit einer Zeitauflösung von 3 ns digitalisiert. Die zugehörige Untereis-Elektronik wurde im LBNL in Berkeley (USA) gebaut.
- Erweiterung des Standard-Datennahmesystems um 250 neue Kanäle.
- Konstruktion eines neuen optischen Empfängers (Optical Receiver Board, ORB).
- Magnetische Abschirmungen aus Mu-Metall und Tragekomponenten für die Strings.

Das Baikal-Experiment

Aktuelle Ergebnisse des Baikal-Experiments sind eine neue obere Grenze für den hochenergetischen diffusen Neutrino-Fluss, eine erste Messung des Energiespektrums atmosphärischer Myonen und der Testbetrieb des Detektors in Koinzidenz mit einem Oberflächendetektor. Darüber hinaus wurden mehrere hydrologische Arbeiten publiziert bzw. zur Publikation eingereicht. Der Neutrino-Detektor ist in zwei internationale Projekte zur Tiefenventilation des Sees und zu Sedimentationsanalysen eingebunden. Gegenwärtig nimmt das Baikal-Experiment mit einer für Unterwasser-Experimente sehr niedrigen Energieschwelle von 6–8 GeV Daten und registriert etwa jeden dritten Tag ein atmosphärisches Neutrino.

DESY Zeuthen unterstützt auch weiterhin die Instandhaltung und den Betrieb des NT-200 Detektors mit Sach- und Personalmitteln und beteiligt sich an der Datenanalyse.

Theoretische Elementarteilchenphysik

Forschungs-Schwerpunkte der Gruppe „Theoretische Physik“ liegen auf den Gebieten

- Präzisions-Vorhersagen von elektroschwachen Prozessen,
- ausgewählte Fragen zu Erweiterungen des Standard-Modells (SM),
- störungstheoretische und nichtstörungstheoretische Untersuchungen zur Struktur der Hadronen,
- nichtstörungstheoretische Quantenfeldtheorie.

Elektroschwache Wechselwirkung

Mehrere Projekte befassten sich mit der Physik der elektroschwachen Wechselwirkung und möglichen Erweiterungen des Standard-Modells. Zur Fermion-Paarproduktion bei LEP- und TESLA-Energien wurden Berechnungen zu QED-Korrekturen mit realistischen experimentellen Schnitten fertiggestellt und das darauf beruhende Fortran-Programmpaket ZFITTER überarbeitet und ausführlich beschrieben [DESY 99-015, 99-070]. Die Resultate wurden auf LEP 2- und Linearcollider-Workshops vorgestellt [DESY 99-037, hep-ph/9909401].

Sehr interessante Möglichkeiten für Präzisionsuntersuchungen auf der Z-Boson-Resonanz könnten mit der Giga-Z-Option des TESLA-Projekts entstehen. Eine Studie zum Potential der Giga-Z-Option für die Suche nach Verletzungen der Lepton-Zahl-Erhaltung, wie sie zum Beispiel von verschiedenen GUT-Theorien („Grand Unified Theory“) vorhergesagt wird, wurde begonnen. Wenn es tatsächlich gelingen sollte, etwa 10^8 Z-Bosonen zu erzeugen, könnte dieser Prozess von großem Interesse sein.

Untersuchungen zu supersymmetrischen Effekten der CP-Verletzung in der Top-Quark Paar-Produktion wurden für den TESLA Linearcollider durchgeführt [DESY 98-195]. Eine weitere Untersuchung zur Produktion schwerer MSSM Higgs-Bosonen und ihre Unterscheidung bezüglich ihrer CP-Parität im Photon-Linearcollider soll in Kürze erscheinen.

Quantenchromodynamik

Auf dem Gebiet der störungstheoretischen Quantenchromodynamik (QCD) wurden Fragestellungen

aus der tiefunelastischen Streuung und der e^+e^- -Annihilation untersucht. Die Ergebnisse mehrjähriger Untersuchungen zu den Skalenverletzungen bei kleinem x wurden zusammenfassend dargestellt [DESY 99-143]. Eine ausführliche Untersuchung befasste sich mit der strukturellen Verallgemeinerung quantenfeldtheoretischer Größen (anomale Dimensionen) und Berechnungsmethoden (Lichtkegelentwicklung) vom Fall der Vorwärtsstreuung auf den allgemeinen Fall der Nicht-Vorwärtsstreuung. Diese Verallgemeinerung ist von Bedeutung für die Beschreibung einer Vielzahl anderer raumartiger physikalischer Prozesse. Zugleich können zentrale Relationen, wie zum Beispiel spezielle Summenregeln, von einer allgemeineren Warte aus verstanden werden [DESY 99-020, hep-ph/9906280].

Auf dem Gebiet der Korrekturen höherer Ordnung wurden strukturelle Analysen der finiten multiplen harmonischen Summen und ihrer mathematischen Eigenschaften fortgeführt [hep-ph/9906491]. Diese sind für eine Beschleunigung von Algorithmen zur Berechnung verschiedener 2- und 3-Schleifen-Observablen von großer technischer Bedeutung.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt lag in der Untersuchung Schema-invarianter Größen auf dem 2-Schleifen-Niveau hinsichtlich ihres Crossing-Verhaltens für s- bzw. t-Kanal-Prozesse, die sogenannte Drell-Yan-Levy Relation. In dieser Untersuchung konnten wichtige Zusammenhänge zwischen differentiellen Streuquerschnitten in der e^+e^- -Annihilation und der tiefunelastischen Streuung im Fall der masselosen QCD gezeigt werden [hep-ph/9812450, hep-ph/9905513]. Es wurden des Weiteren die Targetmassen-Korrekturen im polarisierten Fall [DESY 99-103] numerisch für experimentelle Anwendungen aufbereitet [hep-ph/9905524].

Ein für die Zukunft der Präzisionsphysik wichtiges neues Verfahren zur Berechnung der hadronischen Vakuum-Polarisation wurde entwickelt [DESY 98-206, 99-007]. Die Idee besteht darin, statt der üblichen Größe $R(s)$ die sogenannte Adlerfunktion im euklidischen Gebiet zum Vergleich zwischen experimentellen Daten und den Voraussagen der störungstheoretischen QCD heranzuziehen. Auf diese Weise ist es möglich, die theoretischen Fehler um einen Faktor drei zu reduzieren. Dies ist unter anderem wichtig für die Bestimmung der oberen Schranke der Higgs-Masse aus den LEP/SLC Daten, aber auch für die Perspektiven in der Präzisions-

physik an einem Linearcollider mit hoher Luminosität (TESLA).

Zum Zerfall $Z \rightarrow b\bar{b}$ wurde eine Klasse nicht-faktorisierender 2-Schleifen-Korrekturen berechnet [DESY 99-008, hep-ph/9901402]. Ein Durchbruch ist bei der analytischen Berechnung des Doppel-Box Diagramms bei Impulsen auf der Massen-Schale gelungen [DESY 99-100]. Dies ist ein wichtiger Schritt hin zu einer vollständigen 2-Schleifen-Berechnung des Bhabha-Prozesses, welcher für das Luminositäts-Monitoring bei e^+e^- -Maschinen eine entscheidende Rolle spielt.

Strahlungs-Korrekturen

Bei LEP2 und in erhöhtem Maße bei einem zukünftigen Linearcollider sind Strahlungs-Korrekturen zu den führenden SM-Prozessen von großer Bedeutung für die Interpretation der experimentellen Daten. Anstrengungen in dieser Richtung wurden unternommen, indem zunächst die harte Bremsstrahlung zu dem Prozess mit endlichen Fermionmassen berechnet und in einem Monte Carlo-Programm implementiert wurde [DESY 99-052]. Dabei können sich bei den radiativen Ereignissen erhebliche Massen-Korrekturen ergeben. Zur effizienteren Berechnung von 1-Schleifen-Korrekturen wurde ein verbesserter Algorithmus zur Reduktion von Feynman-Integralen auf Standardform ausgearbeitet [DESY 99-086].

Probleme bei der Interpretation der elektroschwachen Präzisionsdaten im Rahmen erweiterter Theorien wurden untersucht [DESY 99-128]. In Modellen mit $\rho_{\text{tree}} \equiv M_W^2/(M_Z^2 \cos^2 \Theta_W) \neq 1$, zum Beispiel in allen nicht SUSY GUTs, verliert man die SM-Vorhersage der Top-Quark-Masse und solche Modelle erscheinen deshalb als unnatürlich. Insbesondere wurden links-rechts-symmetrische Modelle im Detail untersucht [hep-ph/9904216, hep-ph/9906356, hep-ph/9910279].

In manchen Rechnungen in Eichtheorien, zum Beispiel im Rahmen des Standard-Modells, treten im üblichen Formalismus Probleme mit der Aufrechterhaltung der Eichinvarianz auf. Es wurde deshalb ein neuer Zugang entwickelt, welcher sich ausschließlich auf eichinvariante Greensche Funktionen stützt. Für den bosonischen Sektor des Standard-Modells wurde das erzeugende Funktional dieser Greenschen Funktionen in

der Einschleifen-Näherung berechnet [DESY 98-202]. Als Anwendung dieses eichinvarianten Zugangs wurde anschließend die elektroschwache chirale Lagrange-Funktion untersucht. Dabei wurde die Anzahl der unabhängigen Niedrigenergie-Konstanten in der effektiven Lagrange-Funktion bestimmt sowie deren Werte für das Standard-Modell mit einem schweren Higgs-Boson berechnet [DESY 99-088].

Feldtheorie auf dem Gitter

Die Theoriegruppe befasste sich weiterhin mit nicht-perturbativer QCD. Insbesondere die Monte Carlo-Simulation der QCD auf Raumzeitgittern wurde in mehreren Arbeiten weiterentwickelt und angewandt. Die systematischen Untersuchungen der Diskretisierungsfehler in der $O(a)$ -verbesserten Gitter-Quantenchromodynamik wurden abgeschlossen. Sie demonstrieren die praktische Anwendbarkeit der am DESY entwickelten Methode. Weiterhin wurde eine neue Technik entwickelt, um Meson-Massen und Meson-Matrixelemente präzise zu berechnen [DESY 99-023]. Sie basiert auf dem Schrödinger-Funktional für große Zeitausdehnungen, für die das Funktional durch die niedrig liegenden hadronischen Zustände dominiert wird. Zusammen mit der im Vorjahr entwickelten Renormierung der Quark-Massen wurde die Methode anschließend angewandt, um die Masse des Strange-Quarks in der „quenched“ Approximation zu berechnen [DESY 99-075]. Das Resultat ist sehr präzise. Im Laufe dieser Arbeiten wurde auch der Algorithmus zur Lösung der Dirac-Gleichung im Schrödinger-Funktional verbessert [DESY 99-155].

Im Hinblick auf spätere Anwendungen in der B-Physik wurde eine Methode vorgeschlagen, um die Strom-Normierung in der „Heavy Quark Effective Theory“ mit Hilfe von Monte Carlo-Rechnungen zu kontrollieren [DESY 99-145]. Das Phänomen des „String breaking“ wurde im SU(2) Higgs-Modell weiter untersucht [DESY 99-134, DESY-THESIS 1999-031].

Die Behandlung chiraler Eichtheorien auf dem Gitter wurde für den Fall der Eichgruppe U(1) untersucht [DESY 99-130, 99-140]. Eine mehrjährige Untersuchung des „Deconfinement“ Phasenübergangs in der Ein-Flavor-QCD, möglich mit Hilfe von Lüschers Multiboson-Algorithmus, wurde abgeschlossen.

Nichtstörungstheoretische Feldtheorie

Die Untersuchungen von Instantonen auf toroidalem Hintergrund wurden weitergeführt. Für neue Instanton-Lösungen konnte das „Constituent Monopole Picture“ untermauert werden, nach dem die für QCD-Confinement wichtigen Monopole auch als „Building Blocks“ von Instantonen in Erscheinung treten.

Eine eichinvariante Hamilton-Reduktion wurde als bisher erste und einzige Integrationsmethode für die Lösung von nicht nilpotent geeichten WZNW-Theorien entwickelt, mit der die früher ad-hoc gefundene allgemeine Lösung des $SL(2, \mathbb{R})/U(1)$ -Modells eines Schwarzen Loches reproduziert wurde. Mittels kanonischer Quantisierung wurde die Struktur von Quanten-Parafermionen berechnet, die durch quantenmechanisch wohldefinierte Deformationen ausgezeichnet sind.

In einem weiteren Projekt wurde der Propagator des geladenen Teilchens der skalaren QED nichtstörungstheoretisch für zwei und vier Dimensionen in der quasiklassischen Näherung zum Weltlinien-Pfadintegral berechnet. Es ergeben sich im Infrarotgebiet Funktionen von nur einer SkalenvARIABLEN. In entsprechender Näherung werden Vertexfunktion und Compton-Amplitude berechnet.

Internationale Zusammenarbeit

Die Theoriegruppe ist an vier „Training, Mobility and Research“-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 Proton-Struktur 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. Die zweite Fachtagung des Netzwerkes fand im September 1999 in Firenze/I statt.
- „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. Das Kollaborationsmeeting fand in Frascati/I statt.

- „Hadron Phenomenology from Lattice QCD“. Dieses Netzwerk hat die Weiterentwicklung der Gittereichtheorien und deren Anwendung in der Phänomenologie der Hadronen zum Ziel. Es wurde erst im Herbst 1999 genehmigt und enthält neben DESY Zeuthen neun weitere Knoten in vier europäischen Ländern.
- „Particle Physics Phenomenology at High Energy Colliders“. Das Netzwerk wurde erst kürzlich genehmigt und koordiniert die Zusammenarbeit von Theoretikern aus rund 30 Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen Europas. Die Möglichkeiten der Beschleuniger LEP, Tevatron, LHC und TESLA zur Untersuchung des Standard-Modells und seiner Erweiterungen, insbesondere supersymmetrischer Erweiterungen, werden untersucht.

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

Zusammenarbeit mit Universitäten

Im Sommersemester 1999 wurde eine Fachvorlesung zur Theorie des Standard-Modells an der Technischen Universität Dresden gehalten.

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

Organisation von Fachtagungen

Im August 1999 fand in Buckow, Land Brandenburg, das 33. Internationale Symposium Ahrenshoop zur

Theorie der Elementarteilchen mit 65 Teilnehmern statt. Es war wieder von DESY Zeuthen, der Humboldt-Universität Berlin, und den Universitäten Hannover und München organisiert worden. Gegenstand der Diskussionen waren problemübergreifende Fragen der Theorie der Elementarteilchen.

APE Projekt / Parallelrechnerentwicklung

Für numerische Simulationen von Gittereichtheorien werden sehr hohe Rechenleistungen benötigt, die sich sehr effizient durch Spezialrechner mit SIMD („Single Instruction Multiple Data“)-Architektur erzielen lassen. Ein sehr erfolgreicher Rechner dieser Art (APE100) wurde von italienischen Physikern am INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) entwickelt und seit 1994 bei DESY eingesetzt.

Seit 1996 arbeitet DESY zusammen mit dem INFN an der Entwicklung der neuen Rechnergeneration APEmille. Dieser Rechner ist für eine Spitzenleistung von bis zu 1 TFlop (10^{12} Floatingpoint-Operationen pro Sekunde) ausgelegt und weist verschiedene architektonische Verbesserungen gegenüber APE100 auf, zum Beispiel ein flexibleres Kommunikationsnetzwerk, 64-Bit Arithmetik und lokale Adressierung.

Nach umfangreichen Simulationen zur Verifizierung und zum Test des Prozessor-Designs im Jahr 1998 konnten zu Jahresbeginn 1999 die ersten Chips des Kontrollprozessors und im Mai die ersten Rechen-Prozessoren in Betrieb genommen werden. Bereits nach einer äußerst kurzen Phase von reinen Hardware-Tests konnten umfangreichere Tests mit einfachen Anwendungsprogrammen begonnen werden. Der erfolgreiche Zusammenbau eines ersten größeren Systems mit 16 Boards und 128 Prozessoren (64 GFlops) erfolgte Ende Juli in Rom. Der Aufbau eines Systems mit 256 Prozessoren ist für Dezember vorgesehen.

Während sich DESY zunächst vor allem vor Ort an den Hardware-Tests und der Entwicklung von Test-Software beteiligte, wurden im Oktober in Zeuthen erste Anwendungstests mit einem vollständigen Prozessor Board und der zugehörigen Software-Umgebung begonnen. Zudem wurde in Zeuthen die Hardware (Flink) und die „low level“ Software für die schnelle Vernet-

zung der Host-PCs von APEmille entwickelt und getestet. Mit Aufbau und Tests von größeren APEmille-Systemen bis zu 100 GFlops wird am Jahresende begonnen. Abschließendes Debugging und Optimieren der Compiler-Kette erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Anwendern.

Um auch in Zukunft den Bedarf an Rechenleistung für anspruchsvolle europäische Forschungsprojekte im Bereich der numerischen Simulation von QCD decken zu können, ist die Entwicklung eines Nachfolgerechners von APEmille beabsichtigt. Im Verlauf des Berichtsjahres wurden erste Realisierungskonzepte für die Architektur einer neuen Rechnergeneration untersucht, und es wurde mit technologischen Vorstudien für leistungsfähige Kommunikationslinks begonnen. Einzelheiten des Architektur- und Prozessor-Designs sowie der erforderlichen Softwareumgebung sollen im kommenden Jahr ausgearbeitet und durch „Benchmarks“ mit Kernen von QCD-Programmen ausgewertet werden.

Arbeiten zum TESLA Linearcollider und FEL

DESY Zeuthen ist an den konzeptionellen Arbeiten für einen 500 GeV Elektron-Positron Linearcollider mit integriertem Röntgenlaser aktiv beteiligt. In den zurückliegenden Jahren wurden dabei zwei Linien verfolgt: zum einen die Entwicklung von Diagnostikelementen für die TESLA Test Facility (TTF) und den Freie-Elektronen-Laser (FEL) und zum anderen Studien zur Physik, zu Untergrundproblemen und zur Detektorentwicklung, mit dem Ziel, Beiträge zum „Technical Design Report“ für den Linearcollider TESLA zu erstellen. Im Berichtszeitraum wurde „Grünes Licht“ für ein neues Projekt gegeben, der Errichtung eines Photoinjektor-Teststands. Ziel dieses Projektes ist es, ein gezieltes R&D-Programm für die Erzeugung von Elektronen-Strahlen für TESLA und den FEL durchzuführen, um die erforderlichen Strahlparameter (Elektronenpakete hoher Dichte, geringer Emittanz, entsprechende Zeitstruktur) erreichen zu können.

Arbeiten für die TESLA Test Facility

Im Jahr 1999 wurden die Entwicklungsarbeiten für die Strahlage-Monitore (Cavity- und Wellenleitermo-

nitore) für den Freie-Elektronen-Laser (FEL) an der TESLA Test Facility (TTF) weitgehend abgeschlossen. Die Monitore wurden eingebaut, ihre Eigenschaften vermessen und ihr Verhalten unter Strahlbelastung studiert. Zusätzlich wurden weitere Cavity-Monitore in die TTF mit zugehöriger Elektronik eingebaut und vorhandene Elektronik überarbeitet.

Der Schwerpunkt der Arbeiten, unter sehr starker Beteiligung der technischen Gruppen, war auf die Entwicklung der benötigten Elektronik gerichtet. Hierzu mussten, da es sich um eine bislang in Zeuthen nicht eingesetzte Technologie handelte, einige Voraussetzungen geschaffen werden, wie die Einführung der Mikrowellen-Technologie sowie die Bereitstellung der benötigten Infrastruktur und der Bau von mechanischen Baugruppen wie Containern zur Aufnahme der 12 GHz Mess- und Steuerelektronik und Klemmvorrichtungen für ASM-Stecker. Notwendige Software-Werkzeuge für Schaltungsentwürfe, für die Optimierung von Mikrowellenstrukturen und deren Umsetzung in fertigmachbare Leiterplatten wurden installiert und eingesetzt. Prototypen von HF- und NF-Komponenten wurden erfolgreich getestet. Die Entwicklungsarbeiten auf diesem neuen technologischen Feld waren schwieriger als erwartet und dies führte zu Verzögerungen bei der Fertigstellung der Elektronik. Im Spätherbst wurde dann mit der Serienproduktion begonnen. Parallel zur Elektronik-Entwicklung wurden Kalibrierungsmethoden geschaffen und ihre Anwendbarkeit anhand von Labor- und Strahltests überprüft. Die erzielten Resultate lassen erwarten, dass mit einer raschen Kalibrierung der Wellenleitermonitore zu rechnen ist.

Für die Cavity-Monitore in den Diagnostik-Stationen zwischen den Undulatormodulen liegt die Elektronik vor (12 GHz-Empfänger für Strahl- und Bunchladungsmessungen). Gegenwärtig erfolgen Funktionstests und die Einbindung in das DAQ-System.

Das gemeinsam mit Mitarbeitern von DESY Hamburg entwickelte VME-ADC-Modul, mit 8 Kanälen, 14-bit Auflösung, maximaler Abtastrate von 10 MHz und einer Speichertiefe von 128 Kiloworte pro Kanal (Abb. 80), wurde im Sommer erfolgreich getestet. Die erste Serie von 16 ADCs wurde gefertigt und für die erwähnten Monitore an der TTF-FEL eingesetzt.

Für den Beam-Trajectory-Monitor zur Beobachtung der Lage des Elektronen-Strahls im letzten Undulatormo-

dul wurden umfangreiche Konstruktionsarbeiten abgeschlossen und nahezu alle Komponenten in der mechanischen Werkstatt in Zeuthen gefertigt. Ein einfaches und technologisch neues Verfahren von Pressverbindungen für den Messzylinder wurde nach einer Reihe von Tests beim Bau dieses Monitors genutzt.

Für die zweite Ausbaustufe von TTF-FEL werden drei weitere sogenannte „Micromover“ zur genauen Positionierung der Undulatormodule benötigt. Hierzu wird im Hinblick auf einfache Handhabbarkeit und Kostenreduzierung ein neues Antriebskonzept mit Steuerung entwickelt. Ziel ist es, diese Verstelleinheiten im ersten Halbjahr 2000 bereitzustellen.

Ein Teil der Arbeiten zur Entwicklung und Fertigung der Strahl- und Bunchladungsmessungen wurde in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin durchgeführt.

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

DESY bereitet zur Zeit einen „Technical Design Report“ für den Linearcollider TESLA vor. Neben einer genauen Beschreibung des Beschleunigers soll dieser Bericht auch eine ausführliche physikalische Motivation des Projekts sowie den Vorschlag für einen möglichen Detektor enthalten. Die Physik- und Detektorkapitel werden dabei von einer internationalen Kollaboration im Rahmen eines ECFA/DESY Workshops bearbeitet. An diesem Workshop beteiligen sich Zeuthener Physiker mit einer Reihe von Aufgaben.

Zu den physikalischen Studien gehören:

- Analysen zum SM Higgs-Boson und zur Top-Quark Erzeugung im Energiebereich von 300 bis 500 GeV,
- die Untersuchung des Prozesses $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ bei 500 GeV,
- Studien der Zwei-Fermion-Produktion bei hohen Energien und Interpretation im Rahmen neuer Physik,
- Studie von stop- und sbottom-Produktion im Rahmen supersymmetrischer Modelle,

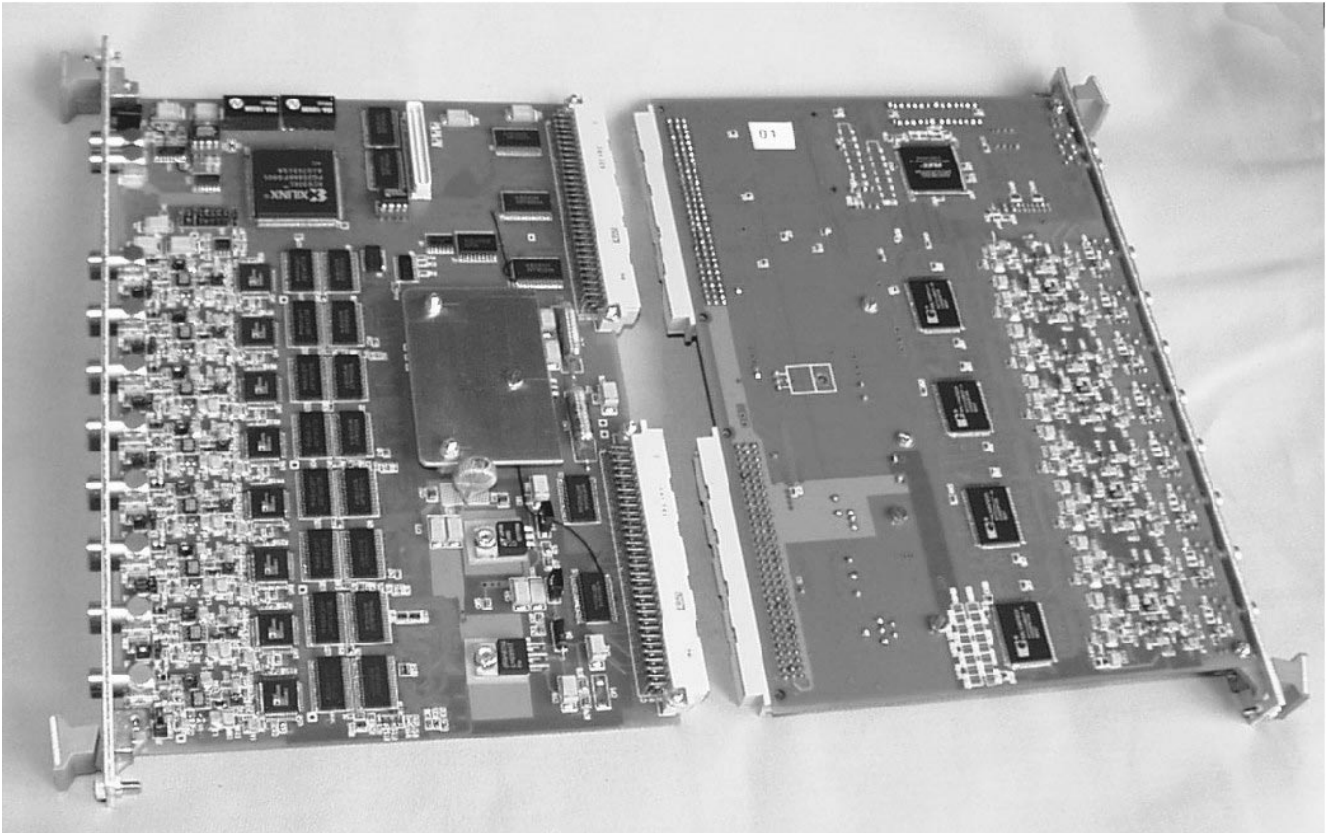


Abbildung 80: VME-ADC-Modul.

- Messung der Top-Yukawa-Kopplung bei 500 und 800 GeV, basierend auf der Option hoher Luminosität von TESLA,
- Studien zur elektroschwachen Physik mit der „Z-Fabrik“ Option des Linearcolliders,
- Messung des Verzweigungsverhältnisses $BR(\text{Higgs} \rightarrow \gamma\gamma)$ in e^+e^- -Kollisionen,
- Koordinierung der Arbeitsgruppe „Electroweak Interactions“ innerhalb der ECFA/DESY Workshop-Serie und in der Weltstudie.

Diese Untersuchungen wurden zum Teil in enger Zusammenarbeit mit der Universität Moskau, Institut für Kernphysik, durchgeführt. Das von der Moskauer Gruppe entwickelte Simulationsprogramm „CompHEP“ gestattet die Analyse komplizierter Prozesse mit Vorgabe der Polarisation im Anfangszustand von e^+e^- , γe oder $\gamma\gamma$ -Wechselwirkungen. Damit bietet

sich die Möglichkeit, das physikalische Potential eines zukünftigen Linearcolliders weiter auszuloten.

Im Rahmen von Simulationsarbeiten ist Zeuthen mit folgenden Aufgaben betraut:

- Software-Entwicklungen zu den Detektorsimulationsprogrammen BRAHMS und SIMDET,
- Pflege der Detektor-Software und Web-Seite,
- Entwicklung eines Detektor-Graphik Programms.

Darüber hinaus sind Zeuthener Mitarbeiter an folgenden Detektorstudien beteiligt:

- Untersuchungen zur Optimierung der Spurrekonstruktion geladener Teilchen unter besonderer Berücksichtigung des Vorwärtsbereichs,

- Untersuchungen zur Messung der Beam-Strahlung und der Energieunschärfe des Strahls mit Hilfe von Bhabha-Streuung,
- Abschätzungen zum relativen Myon-Untergrund und Möglichkeiten seiner Unterdrückung.

Photoinjektor-Teststand

Der Aufbau des Teststandes erfolgt in Zusammenarbeit mit BESSY, dem Max-Born-Institut Berlin und der TU Darmstadt. Dieses Projekt wird mit Mitteln aus dem Vernetzungsfonds unterstützt. Im Herbst 1999 wurde mit den Vorbereitungen, wie Ausarbeitung der Bauunterlagen, Aufstellung des Sicherheitsberichtes, Organisation der Zusammenarbeit und Aufbau der Projektgruppe, begonnen.

Experimente Support

Die Gruppe bietet ein breites Spektrum von Dienstleistungen an, unter anderem

- Betreuung der Kopierer und der Projektoren,
- Kopieren, Binden und Bereitstellen von Dokumentationen,
- Erfassung der Dosimeter der Mitarbeiter,
- Schreib- und Datenbankarbeiten
- Grafikarbeiten, Posteranfertigung
- Betreuung der zahlreichen ausländischen Gäste.

Mitarbeiter der Gruppe unterstützen die Projektgruppen auch durch Übernahme einfacher Montagearbeiten und Betreuung von Produktionsruns großer Applikationsprogramme. Der Bildbearbeitung kommt bei den Aktivitäten der Gruppe ein immer größerer Stellenwert zu, da die sich bietenden Möglichkeiten immer stärker

sowohl bei der Erstellung wissenschaftlicher Publikationen als auch bei der Anfertigung von Präsentationen und Postern für die Öffentlichkeitsarbeit genutzt werden.

Im Berichtsjahr war die Gruppe maßgeblich an der Organisation des 7. Internationalen Workshops „Deep Inelastic Scattering 99“ beteiligt. Die Gruppe unterstützte auch die Organisatoren des Arbeitstreffens Astroteilchenphysik des BMBF.

Für die Öffentlichkeitsarbeit bei DESY Zeuthen wurden verschiedene Ausstellungsexponate in Zusammenarbeit mit den Werkstätten erstellt. Wichtigster Termin im Berichtszeitraum war sicher der „Tag der Offenen Tür“, der im Mai 1999 stattfand. Hierfür wurden zahlreiche Poster und Informationsbroschüren erstellt. Neben Druck und Versand von Einladungen an Schulen, Gäste und Presse konzentrierte sich die Arbeit auf die Vorbereitung von verschiedenen Informations- und Demonstrationsständen sowie die Durchführung der Veranstaltung, zu der mehr als 1300 Besucher kamen.

Im August 1999 beteiligte sich DESY Zeuthen mit einer Ausstellung am Wissenschaftsjahrmarkt der Stadt Stuttgart (Sonnenfinsternis). Die in Zusammenarbeit mit der FH Brandenburg erstellte Videoanimation über das Neutrino-Teleskop AMANDA wurde hierbei erstmals öffentlich vorgestellt. Weitere Präsentationen umfassten den Brandenburger „Tag der Wissenschaft und Forschung“ in Cottbus und den „Marie-Curie-Tag“ des Gymnasiums in Ludwigsfelde im November 1999.

Für zwei große Ausstellungenbeteiligungen im Jahr 2000, die DESY-EXPO in Hamburg und die Berliner Wissenschaftsausstellung „Sieben Hügel“ wurden Vorarbeiten geleistet, ebenfalls erste Arbeiten zum „Jahr der Physik“.

Eine Hauptaufgabe ist die Organisation von Vorträgen und Laborbesichtigungen. Hiervon machen vor allem Schulklassen regen Gebrauch. Im Berichtsjahr wurden auch Besichtigungsfahrten von Studenten und Schülern zu DESY Hamburg organisiert.