

Forschungsthemen DESY Zeuthen

Teilchen- und Astrophysik

Das H1-Experiment

Reparatur und Upgrade des Backward Silicon-Tracker BST

In der Experimentpause 2003 wurde der lang geplante Austausch von Silizium-Streifendetektoren der ersten Generation gegen einen rauschärmeren Detektortyp für den BST durchgeführt. Dieser Detektortyp ist schon mit guten Resultaten im Forward Silicon Tracker im Einsatz und lässt eine höhere Qualität der Spurrekonstruktion auch im Rückwärtsbereich zu. Zusätzlich zu diesen geplanten Arbeiten wurden umfangreiche Reparaturarbeiten an der Ausleselektronik sowohl der BST Strips als auch eines Teils der BST Pad Detektoren notwendig. Die Elektronik hatte durch Strahlverluste von HERA Schaden genommen und musste durch strahlungstolerantere Bauteile ersetzt werden. Diese kurzfristig durchgeführten Arbeiten wären ohne die enge Zusammenarbeit mit der Universität Prag und die Mitarbeit der Gruppe ZE nicht möglich gewesen. Arbeiten an der experimentnahen Softwareoptimierung wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Prag, der Universität Zürich und dem Rutherford Laboratory weitergeführt.

Physikalische Analyse

Im Zentrum der physikalischen Analyse stand die Analyse von Daten aus dem Sommer 2000, in denen der Vertex um +70 cm verschoben war, sowie von Minimum Bias Trigger-Daten. Die Resultate werden voraussichtlich im Jahr 2004 publiziert. Erstmals wurde die longitudinale Strukturfunktion F_L bei kleinen Impulsüberträgen Q^2 ($\sim 1 \text{ GeV}^2$) bestimmt und zur DIS03 in Sankt Petersburg vorgestellt. Dies umfasst die Präzisionsmes-

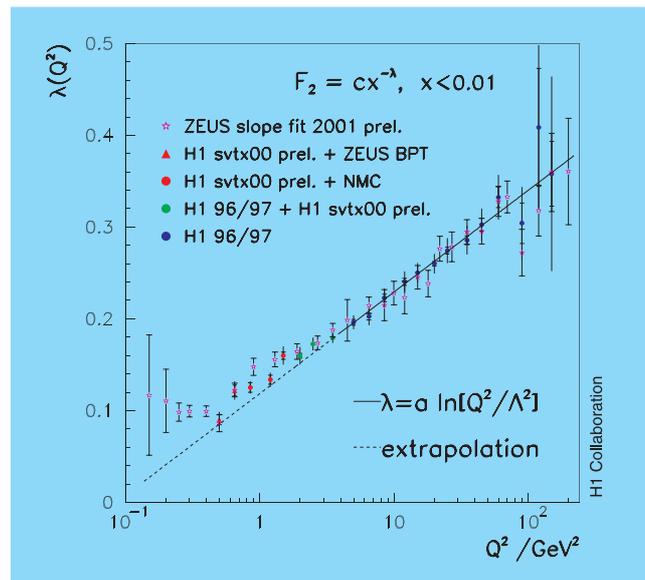


Abbildung 74: Bestimmung des Koeffizienten λ der Parametrisierung $F_2 \sim x^{-\lambda}$ der Strukturfunktion F_2 . Sichtbar ist der Übergang bei Q^2 um 1 GeV^2 vom perturbativen zum nichtperturbativen Bereich aus den Minimum Bias Daten des H1-Experiments (H1 Preliminary).

sung des inklusiven Streuquerschnitts mit bis zu 3% Genauigkeit im Übergangsbereich von tief-inelastischer Streuung zum nichtperturbativen Bereich.

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde ein Modell, das die Nukleonstruktur aus fraktalen Strukturen erklärt und zu einer guten Beschreibung der Partondichte im Proton führt, entwickelt und getestet.

Die Zusammenarbeit mit Physikern der Universitäten in Dortmund, Prag und Montenegro wurde fortgeführt. Eine neue Arbeit betrifft Daten des Jahres 2000 mit Standardvertex, die speziell von der Gruppe der Universität Podgorica (Montenegro) in Angriff genommen

wurde. Vorläufige Ergebnisse der Analyse wurden auf dem H1 Meeting in Marseilles vorgestellt.

Mit sehr gutem Ergebnis wurde eine Diplomarbeit der Universität Podgorica zu ersten Messungen mit dem H1 Forward Silicon Tracker in Zeuthen betreut. Eine Doktorarbeit sowie eine Diplomarbeit zum BST-PAD Trigger für H1 wurden erfolgreich abgeschlossen.

Die Gruppe in Zeuthen begann, in der Heavy Flavour Gruppe des H1 Experiments mitzuarbeiten. Als erstes wurde die Ionisationsmessung zur Teilchenidentifikation in der zentralen Jetkammer von H1 kalibriert.

Im Rahmen der Strategieguppe zur Perspektive der Teilchenphysik am DESY wurden von Physikern der Gruppe Beiträge zur möglichen Fortsetzung oder dem Ausbau des experimentellen Programms mit HERA (HERA2/HERA3) erbracht.

Das Forward Proton Spectrometer FPS und das Very Forward Proton Spectrometer VFPS

Das Forward Proton Spectrometer FPS wurde in der Experimentpause 2003 durch Einbau der horizontalen Stationen erweitert. Die neue Strahloptik des Protonenstrahls von HERA2 wurde in die Simulation des FPS integriert. Die Programmkette Simulation-Rekonstruktion wurde für das FPS überarbeitet und auf das VFPS erweitert.

Das HERMES-Experiment

Beitrag zum Silizium Detektor des „Recoil Detektors“

Die Untersuchungen zu den Eigendrehimpulsen der Nukleonbestandteile (Quarks und Gluonen) konzentrierten sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten auf die Anteile gemessen entlang der Bewegungsrichtung des Nukleons. Diese auch als longitudinale Partonspin-Verteilungen bekannten phänomenologischen Funktionen wurden in dem erst vor wenigen Jahren entwickelten theoretischen Konzept der verallgemeinerten Parton-Verteilungen (GPD's) auf die transversale Richtung erweitert. Auf der Basis dieses Konzepts kann erwartet werden, dass in der Zukunft experimentelle Aussagen auch zum Gesamt-

Drehimpuls der Nukleonbestandteile erhalten werden können. Bildlich gesprochen ergibt sich damit erstmals eine 3-dimensionale Darstellung des Nukleons.

Eine Messung dieser Verteilungsfunktionen erfordert eine neue Qualität der experimentellen Arbeit, nämlich die Untersuchung bestimmter Endzustände, die bei Wechselwirkungen polarisierter Elektronen oder Positronen mit z. B. Protonen entstehen. Aus theoretischer Sicht am saubersten zu beschreiben ist die tief-virtuelle Compton-Streuung, wobei ein bei der Wechselwirkung abgestrahltes (virtuelles) Lichtquant aus dem zu untersuchenden Proton ein experimentell nachweisbares (reelles) Lichtquant ausschlägt. Um diese Reaktion eindeutig nachweisen zu können, müssen gegebenenfalls auch Pionen gemessen werden, welche aus dem Zerfall einer kurzlebigen, durch Anregung des Protons entstandenen (Delta-) Resonanz stammen. Dafür, insbesondere aber zum Nachweis der langsamen (Rückstoß-) Protonen selbst, wird ein mehrlagiger Recoil Detektor um das röhrenförmige Gastarget des HERMES-Experiments gebaut. Physiker der Zeuthener Gruppe sind aktiv an Entwicklung und Bau der innersten zwei Lagen dieses Recoil Detektors, bestehend aus Siliziumsensoren, beteiligt.

Zentraler Punkt der Auslese des Siliziumdetektors ist ein analoger Auslesechip mit 128 Kanälen, der Helix 128-3.0. Jeder Kanal verfügt über einen Vorverstärker und weitere Elektronik zur Signalverarbeitung. Die Ansprüche an die Leistungscharakteristik eines jeden Chips sind besonders hoch, da der Siliziumdetektor sowohl zur Spur- als auch zur Impulsmessung genutzt werden soll. Für einen Funktionstest wurde ein spezieller Testaufbau unter Verwendung einer Nadelkarte entwickelt. Hierbei wurde jeder einzelne Helix-Auslesechip mit Testnadeln kontaktiert. Abbildung 75 zeigt den Blick auf einen Helix Chip mit den Testnadeln.

Mit Hilfe eines detaillierteren automatisierten Messprogramms wurden Parameter wie Signalverstärkung und Signalrauschen in Abhängigkeit von wählbaren Voreinstellungen gemessen. Es wurden nur diejenigen Chips ausgewählt, bei denen alle wichtigen Parameter (wie z. B. der Pipeline Pedestalwert) innerhalb eines schmalen vorgegebenen Bereichs lagen.

Im Frühjahr 2003 konnten die Hauptkonstruktionsaufgaben und die Erstellung von Fertigungszeichnungen

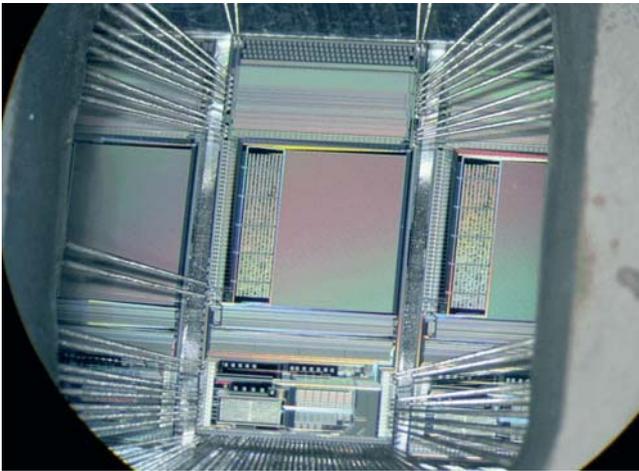


Abbildung 75: Blick auf einen $6 \times 13 \text{ mm}^2$ großen Helix Chip unter der Nadelkarte. Testnadeln sind auf die Kontaktpunkte gesetzt.

abgeschlossen werden. Parallel dazu wurden die Vorbereitungen für die mechanische Fertigung abgestimmt. Die mechanischen Detektorkomponenten wurden in den DESY-Werkstätten Zeuthen und Hamburg und in Kooperation mit externen Firmen hergestellt. Eine besondere Herausforderung war die hochpräzise Bearbeitung des Hauptträgers für die Siliziummodule auf einem 5-Achsen Bearbeitungszentrum, bei dem sämtliche Geometriedaten in die Maschine eingelesen wurden. Abbildung 76 zeigt die Streukammer mit Drehvorrichtung (Inserting tool) und den Hauptträger für die Siliziummodule.

Die Fertigung der 5 Detektorkomponenten und der zahlreichen Montagevorrichtungen konnte im wesentlichen im Spätherbst 2003 abgeschlossen werden. Für Montage und Funktionstests der Detektoren wurde mit dem Aufbau einer Testanlage in der Hermes-Halle in Hamburg begonnen. Es ist geplant, den Recoil-Detektor im Shutdown 2005 einzubauen.

Das HERA-B-Experiment

Das HERA-B-Experiment hat im Berichtsjahr die Datennahme für das genehmigte Programm mit dem Schwerpunkt „Charmonium-Produktion“ in Proton-Kern-Reaktionen abgeschlossen (siehe auch den

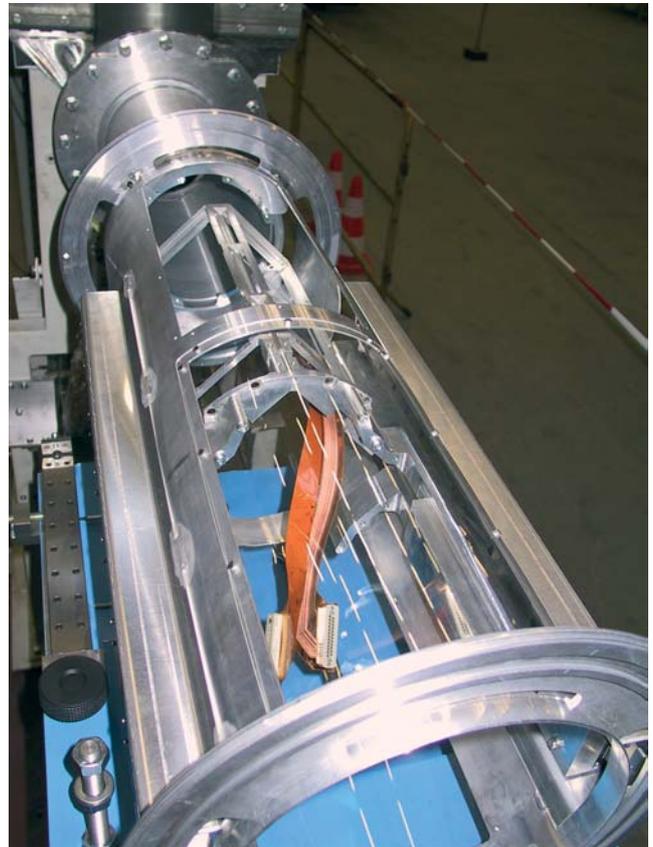


Abbildung 76: Streukammer mit Drehvorrichtung und der Hauptträger für die Siliziummodule.

HERA-B-Teil in diesem Bericht). Nach einer Einlaufphase im Jahr 2002 konnten von etwa Oktober 2002 bis Anfang März 2003 mit einem gegenüber der Strahlperiode 2000 deutlich verbesserten Detektor Daten genommen werden. Trotz der Anlaufprobleme von HERA nach dem Luminositäts-Upgrade konnte die Datennahme parallel zum Entwicklungsprogramm der Maschine und mit relativ guter Effizienz durchgeführt werden. Das Experiment hat in dieser Phase etwa 300.000 Ereignisse mit rekonstruierten leptonischen J/ψ -Zerfällen und etwa 200 Millionen „Minimum Bias“-Ereignisse in Proton-Kern-Reaktionen aufgezeichnet.

Die Anzahl der J/ψ -Ereignisse liegt um ein Vielfaches unterhalb der Planung, bedingt vor allem durch die Probleme der HERA-Maschine. Dennoch wird das HERA-B-Experiment voraussichtlich mit

dem Hauptprogramm, der Messung der Wirkungsquerschnitte für die Produktion von Bottom-Quarks und von Charmonium-Zuständen, wesentliche Beiträge zu diesem Gebiet machen können. Limitierungen werden sich vor allem in der Bestimmung der Abhängigkeiten der differentiellen Wirkungsquerschnitte von den Kernmassen zeigen.

Der „Minimum Bias“-Datensatz erlaubt Analysen der flavour-abhängigen Wirkungsquerschnitte. Interessante Beiträge sind für die Abhängigkeiten der Wirkungsquerschnitte von den Kernmassen bei negativen Feynman- x zu erwarten.

Nach Beendigung der Datennahme hat sich die HERA-B-Gruppe von Zeuthen und der Humboldt-Universität zu Berlin in folgenden Aktivitäten engagiert:

- Kalibration und Kontrolle der Datenqualität des Spurkammersystems „Outer Tracker“,
- Erweiterung und Betrieb der Prozessorfarmen,
- Software-Entwicklung und -Wartung,
- Datenanalyse.

Outer Tracker

Die Zeuthener Gruppe hat sich während der Datennahme an dem Betrieb sowie der Sicherung und Kontrolle der Datenqualität des Outer Tracker-Systems beteiligt. Die Spurrekonstruktion in diesem Detektor konnte durch Kalibration und Alignment weiter verbessert werden. Die Auflösung einer Detektorzelle mit 5 mm Durchmesser beträgt 300 μm . Für verschiedene Strahl-Perioden sind detaillierte Effizienztabellen für alle Detektorlagen erstellt worden.

Prozessorfarm

In der ersten Hälfte des Berichtsjahres wurden noch einmal wesentliche Verbesserungen und Erweiterungen der Systemsoftware der Prozessorfarmen in Hinblick auf eine effiziente Nutzung im Offline-Modus durchgeführt.

Bereits seit 2001 werden die Online-Farmen mit 440 Prozessoren in Zeiten, in denen keine Daten genommen wurden, mit der gleichen Steuerungssoftware wie im

Online-Betrieb zum Reprozessieren der Daten benutzt. Im Jahr 2003 wurde das System so weiter entwickelt, dass die volle Monte-Carlo-Produktion auf den Farmen möglich wurde. Die Produktion verläuft dabei in zwei Stufen: Zunächst werden die Ereignisse erzeugt und durch die Detektorsimulation geschickt. Die zweite Stufe ist abgetrennt, weil die simulierten Ereignisse entsprechend der Bedingungen während der Datennahme überlagert werden. In dieser Stufe wird dann weiter die Erzeugung der Detektorsignale, die Triggersimulation und die volle Rekonstruktion durchgeführt. Der erste Schritt erfolgt mit einer Rate von etwa 12 Hz (also etwa 1 Million Ereignisse pro Tag), die zweite Stufe mit etwa 100 Hz.

Software und Datenanalyse

Spurrekonstruktion: Im Berichtszeitraum wurde vor allem die Leistungsfähigkeit der Software für die Spurrekonstruktion bezüglich Effizienz, Auflösung und Zusammenwirken mit den anderen Detektorkomponenten untersucht.

Simulation: Das Simulationsprogramm von HERA-B, das auf den LUND-Generatoren zur Erzeugung physikalischer Prozesse und auf GEANT3 zur Detektorsimulation basiert, wurde weiterhin in Zeuthen gewartet und aktualisiert. Unter anderem wurden verschiedene Versionen von Geometriedaten erstellt, zum Beispiel auch für die in dem Berichtsjahr eingereichten Vorschläge zur weiteren Nutzung des HERA-B-Detektors. An verschiedenen Stellen hat sich bei den ersten Analysen der Daten ergeben, dass Erweiterungen des Simulationsprogramms notwendig wurden.

Datenanalyse: Der Schwerpunkt der Arbeiten in der Gruppe lag bei der Analyse der in 2002 und 2003 genommenen Daten. Dabei ging es zunächst hauptsächlich um die Bestimmung der Datenqualität, der Schwerpunkt lag dabei auf den J/ψ -Daten.

Physikalisches Schwerpunktthema war die Charmonium-Produktion. Im Rahmen von Doktorarbeiten wird die inklusive Produktion von J/ψ^- , ψ'^- und χ_c -Zuständen untersucht. Für die J/ψ^- , ψ'^- -Analyse gibt es erste Ergebnisse (Abb. 77). Desweiteren wurde in einer Diplomarbeit die Polarisierung der in Proton-Kern-Stößen erzeugten J/ψ -Mesonen analysiert.

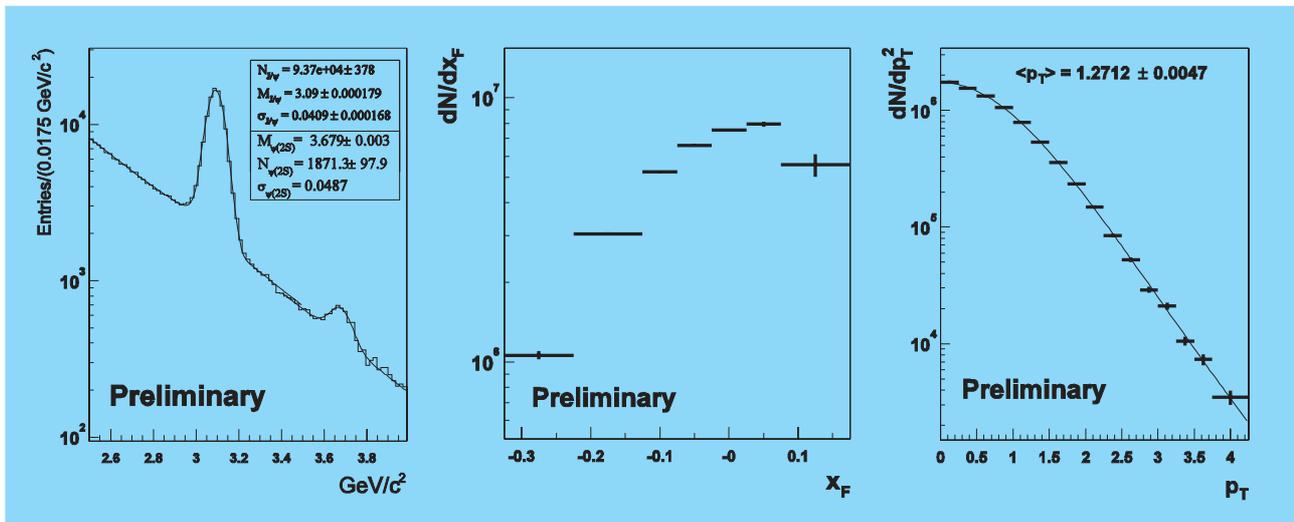


Abbildung 77: Vorläufige Ergebnisse der Analyse der Produktion von J/ψ und ψ' in den Zerfallskanälen $J/\psi, \psi' \rightarrow \mu^+\mu^-$: Invariante $\mu^+\mu^-$ -Massenverteilung (links), Feynman- x -Verteilung (Mitte) und Transversalimpuls-Verteilung (rechts) der J/ψ -Mesonen.

Die Zeuthener Gruppe hat auch zu einem Vorschlag beigetragen, doppel-diffraktive Prozesse, insbesondere auch Glueball-Produktion, mit dem HERA-B-Detektor zu untersuchen. Dazu wurde die exklusive Produktion von Teilchenzuständen niedriger Multiplizität, wie $K_s^0 K_s^0$, $K^\pm K_s^0 \pi^\pm$ untersucht.

Die Gruppe der Humboldt-Universität beteiligt sich außerdem an der Analyse des Wirkungsquerschnittes für Bottom-Produktion in Proton-Kern-Stößen, der Analyse der direkten Produktion harter Photonen sowie der Analyse von Strangeness-Produktion unter Benutzung der „Minimum Bias“-Daten.

Arbeiten zum Linear Collider Projekt

Physik- und Detektorstudien

Zeuthen beteiligt sich weiterhin an den Vorstudien zur Physik und zum Detektor an einem künftigen Linear Collider. Schwerpunkte der Arbeiten sind Studien zu einem Photon Collider bei TESLA, Entwicklungen für ein Kalorimeter direkt am Strahlrohr als instrumentierte Maske und zur Erzeugung polarisierter Positronen.

Diese Arbeiten werden im Folgenden näher beschrieben. Die Studien sind zum Teil unabhängig von einer bestimmten Beschleunigertechnologie; Ausnahme sind die Arbeiten zum $\gamma\gamma$ -Collider, die für das TESLA Projekt durchgeführt wurden.

Arbeiten für den Photon-Collider

Im Prinzip besteht die Möglichkeit, TESLA um einen $\gamma\gamma$ -Collider zu erweitern, indem man die Strahlen kurz vor dem Wechselwirkungspunkt mit einem Laserstrahl kollidiert. Durch Compton Streuung werden dann Photonen mit maximal 80% der Elektronenergie erzeugt, die im Wechselwirkungspunkt kollidieren. Es wurde die technische Machbarkeit dieses Projekts untersucht und Studien zur physikalischen Motivation durchgeführt.

Wenn ein leichtes Higgs existiert, ist der Wirkungsquerschnitt des Prozesses $\gamma\gamma \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$ groß genug, dass er zur Messung der partiellen Zerfallsbreite des Higgs in zwei Photonen genutzt werden kann. Die Messung dieser Zerfallsbreite ist sehr wichtig, da der Zerfall des Higgs in zwei Photonen über Schleifendiagramme verläuft und der Prozess daher sehr sensitiv auf Physik jenseits des Standardmodells ist. In Zeuthen wird die-

ser Prozess detailliert simuliert unter Berücksichtigung aller Detektor- und Untergrund-Einflüsse, so dass die erreichbare Messgenauigkeit zuverlässig abgeschätzt werden kann.

Eine mögliche Erweiterung des Standardmodells ist die Supersymmetrie. Falls es supersymmetrische Teilchen im Energiebereich von TESLA gibt, ist die Produktionsrate im $\gamma\gamma$ -Modus höher als im e^+e^- -Modus. Es ist daher sinnvoll zu untersuchen, in welchem Modus Zerfallparameter der supersymmetrischen Teilchen besser gemessen werden können. In Zeuthen wird die Produktion von Charginos und Smuonen im Detail untersucht. Ferner wird in Zusammenarbeit mit Physikern aus Dubna die Produktion von Top-Squarks studiert.

Wenn kein leichtes Higgs existiert, erwartet man, aus Messungen der Eichboson-Selbstkopplung Rückschlüsse auf den Mechanismus der elektroschwachen Symmetriebrechung ziehen zu können. Auch die Produktionsrate von Eichbosonen ist im $\gamma\gamma$ -Modus wesentlich höher. Detaillierte Studien zu den Prozessen $e\gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \nu W^-$ und $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ werden in Zeuthen durchgeführt. Es scheint sich dabei eine ähnliche Sensitivität wie im e^+e^- -Modus zu ergeben, wobei die Ergebnisse bei der Interpretation innerhalb von Modellen komplementär sind.

Durch die Aufweitung des Elektronstrahls in der Kollision mit dem Laser treffen viel mehr Strahlteilchen den Detektor im Bereich um das Strahlrohr. Durch Rückstreuung führt dies zu einem erheblich höheren Untergrund niederenergetischer Photonen im gesamten Detektor. Simulationen zeigen, dass mit dem Entwurf einer geeigneten Maske um das Strahlrohr dieser Untergrund auf ähnliche Werte wie im e^+e^- -Fall reduziert werden konnte.

Die große Herausforderung beim $\gamma\gamma$ -Collider ist der Bau des Hochleistungslasers. Für die Kollision mit den Elektronenpaketen werden Laserpulse von ca. 10 J Energie, ein bis zwei Pikosekunden Dauer und der Zeitstruktur des Beschleunigers gebraucht. Mit Hilfe eines Ringresonators kann die Laserenergie gespeichert und damit die Anforderung an den Laser um etwa einen Faktor 100 verringert werden. Eine detaillierte Studie eines solchen Resonators (siehe Abbildung 78) wird zur Zeit in Zeuthen ausgearbeitet, diese Arbeiten werden Anfang des Jahres 2004 abgeschlossen.

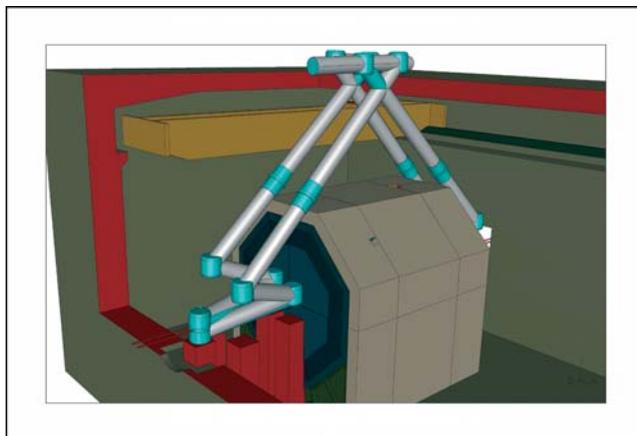


Abbildung 78: Integration des Laser-Resonators in den Detektor.

Physikanalysen

Die seit Jahren bestehende gute Zusammenarbeit mit dem Institut für Kernphysik der Staatsuniversität Moskau zur Auslotung des physikalischen Potenzials eines e^+e^- -Linearcolliders wurde fortgeführt. Die Studien konzentrierten sich auf die Frage, ob und wie gut es möglich ist, die verschiedenen MSSM Higgsteilchen im Regime intensiver Kopplung zu erkennen und deren Eigenschaften zu vermessen.

Darüber hinaus ist es auch im Berichtszeitraum notwendig gewesen, das schnelle Detektor-Simulationsprogramm SIMDET zu verbessern bzw. an neue Entwicklungen anzupassen.

Polarisierte Positronenquelle

Um das Physikpotenzial eines künftigen e^+e^- -Colliders vollständig nutzen zu können, besteht der Wunsch, neben dem Elektronenstrahl auch den Positronenstrahl zu polarisieren und damit den Anfangszustand der zu beobachtenden Reaktionen im quantenmechanischen Sinne eindeutig festzulegen. Mit einem polarisierten Positronenstrahl werden für viele Reaktionen das Signal-zu-Untergrundverhältnis wesentlich verbessert und die experimentellen Fehler durch die Polarisationsmessung reduziert. Wichtige Messungen, wie z. B.

Giga-Z oder Messungen mit transversaler Strahlpolarisation, werden erst mit Positronenpolarisation sinnvoll. Neben Physikstudien zu einzelnen Prozessen mit Polarisation beteiligt sich die Zeuthener TESLA Gruppe zusammen mit der Humboldt-Universität zu Berlin und DESY Hamburg am E166 Experiment am Stanford Linear Collider Center (SLAC). Dieses Experiment soll erstmals demonstrieren, dass es möglich ist, die Positronen bereits bei ihrer Erzeugung in der Quelle zu polarisieren. Es handelt sich um ein gemeinsames Experiment der drei weltweiten Linearcolliderprojekte JLC, NLC und TESLA. DESY hat die Verantwortung für Design, Bau, Betrieb und Auswertung des Polarimeters übernommen, mit dem die erreichte Polarisation vermessen werden wird.

Die Idee für die Erzeugung polarisierter Positronen geht auf eine Arbeit von Balakin und Mikhailichenko aus dem Jahre 1979 zurück (V. Balakin, A. Mikhailichenko, Conversion system for obtaining highly polarized electrons and positrons at high energy, Budker INP 79-85, September 13, 1979). Ein hochenergetischer Elektronenstrahl durchläuft einen helikalen Undulator und erzeugt dabei zirkular polarisierte Synchrotronstrahlung, welche hinter dem Undulator auf ein dünnes Target trifft. Dort bilden sich paarweise Elektronen und Positronen, die ihrerseits polarisiert sind. Fängt man mit der nachfolgenden Strahl-optik lediglich die hochenergetischen Positronen ein, erwartet man, Polarisationsgrade von bis zu 60% zu erreichen. Beim E166 Experiment ist keine solche Strahl-optik geplant. Statt dessen werden mittels eines Magnetspektrometers Positronen bestimmter Energie ausgewählt und zur Analyse auf das Polarimeter geleitet. Detektorstudien haben gezeigt, dass einzig ein Comptontransmissionspolarimeter die geforderte Messgenauigkeit erreichen kann. Es besteht aus einem Analysatormagneten (Verantwortung DESY Hamburg) und einem CsJ(Tl) Kalorimeter (Verantwortung DESY Zeuthen).

Im Jahr 2003 wurden umfangreiche Tests mit CsJ Kristallen durchgeführt, um das optimale Verfahren zur Lichtauslese zu ermitteln. Zwei Testdetektoren wurden aufgebaut und in Hamburg am DESY-II Teststrahl erfolgreich getestet. Wesentliche Teile der Hardware wurden von der Universität Dresden (CsJ-Kristalle, Photodioden), SLAC (Vorverstärker) und von der University of Massachusetts (Readout-Elektronik) zur Verfügung gestellt. Die beiden Testdetektoren werden An-

fang 2004 am SLAC installiert, um Daten zu den Untergrundbedingungen zu erhalten.

Das Design des gesamten Kalorimeters wird z. Zt. fertiggestellt. Im Oktober 2004 und Januar 2005 wird E166 am SLAC Daten nehmen, so dass das Experiment bis Ende 2005 abgeschlossen sein wird.

R&D für strahlnahe Kalorimeter eines Linear-Collider Detektors

In der strahlnahen Region des geplanten Linear-Collider Detektors sind zwei Kalorimeter vorgesehen, welche extremen Anforderungen genügen müssen und daher intensive Grundlagenforschung erfordern. Das BeamCal, welches direkt an der Strahlröhre anliegt und einen Polarwinkel von 4 bis 28 mrad überdeckt, muss unter sehr hoher Strahlenbelastung funktionstüchtig bleiben. Das anschließende LumiCal bei Polarwinkeln zwischen 26 und 82 mrad ist ein Instrument zur hochpräzisen Luminositätsmessung.

Im Rahmen einer internationalen Kollaboration erfolgt die Ausarbeitung eines technischen Designs für beide Kalorimeter. Die wesentlichen Aufgaben sind dabei umfangreiche Monte-Carlo-Studien und Tests von Sensor Prototypen.

In das BeamCal werden bei jedem Zusammenstoß der Elektron- und Positron-Pakete eine große Zahl von Elektron-Positron-Paaren gestreut, die von der Beamstrahlung, einem neuen Phänomen bei Linear-Collidern, herrühren. In der Summe beträgt deren Gesamtenergie einige 10 TeV. Die Verteilung dieser Energie im Bereich des BeamCal kann zur Strahl-diagnose und Korrektur genutzt werden. Zudem sollen hochenergetische einzelne Elektronen bis zu kleinsten Polarwinkeln erkannt werden, da diese einen Untergrund bei der Suche nach neuen Teilchen verursachen.

Um beide Ziele zu erreichen, muss das innere Kalorimeter sehr kompakt sein, eine hohe Granularität besitzen, und die Sensoren müssen eine Strahlendosis von mehr als 10 MGy pro Jahr verkraften. Varianten sind ein Diamant-Wolfram-Sandwich Kalorimeter, wie es in Abbildung 79 gezeigt ist, oder ein Kalorimeter aus Szintillatorkristallen. Die Segmentierung der Sensoren oder Kristalle wurde nach Monte-Carlo-Studien fest-

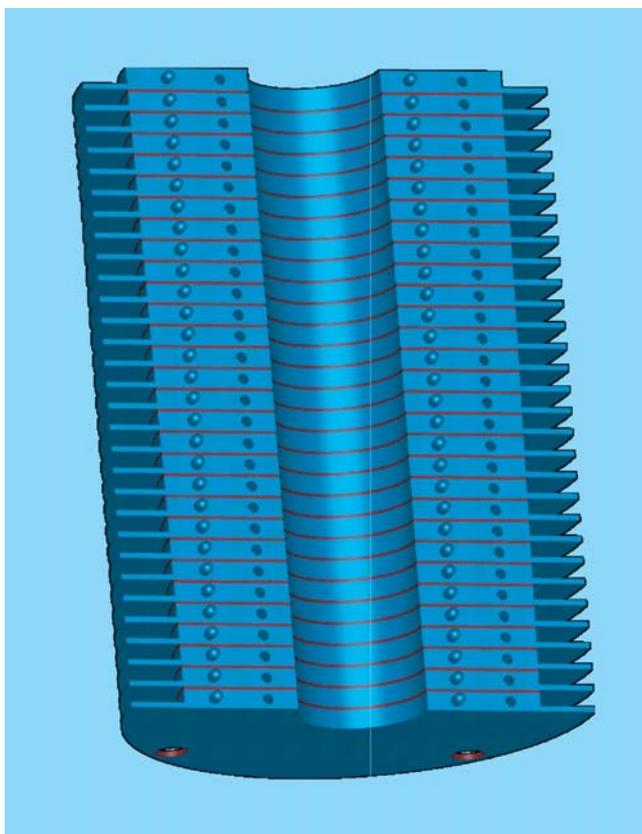


Abbildung 79: Der Aufbau einer Hälfte des Diamant-Wolfram-Sandwich Kalorimeters. Die Diamantsensoren liegen zwischen den Wolframringen. Durchmesser und Länge des Kalorimeters betragen etwa 15 cm.

gelegt. Zur Bestückung des in Abbildung 79 gezeigten Kalorimeters werden großflächige Diamant-Sensoren benötigt.

In Zeuthen wurden deshalb Untersuchungen an Diamant-Sensoren begonnen, die das Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik in Freiburg für DESY angefertigt hat. Ein Sensor der Größe $12 \times 12 \text{ mm}^2$ ist in Abbildung 80 gezeigt. Neben den elektrischen Eigenschaften wurde die Effizienz der Ladungssammlung mit einem Elektronenstrahl aus einer ^{90}Sr -Quelle gemessen. Die Werte für diese Effizienz liegen zwischen 5 und 20%. Zwischen den Sensoren gibt es große Unterschiede, deren Ursachen durch weitere Untersuchungen geklärt werden sollen.

Für die Variante Szintillations-Kristalle wurden Segmente aus Plastik-Szintillatoren gefertigt, welche etwa

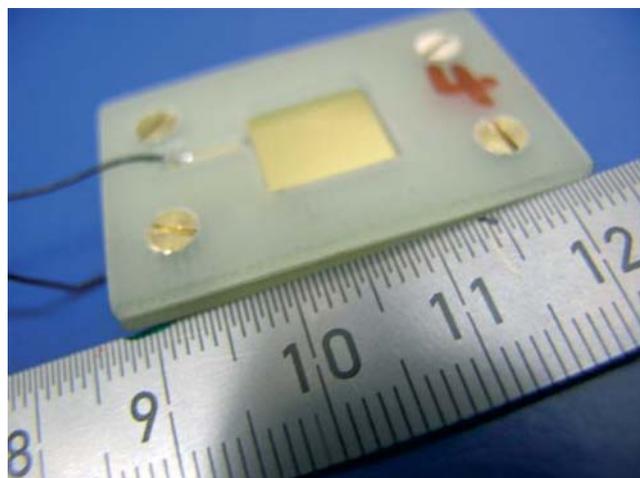


Abbildung 80: Ein Diamant-Sensor im Rahmen für Testmessungen.

den Abmessungen der Kristalle im BeamCal entsprechen, mit optischen Fasern zur Lichtauskopplung versehen und zu einem Mini-Modul zusammengefügt. Die Lichtmenge und das Übersprechen zwischen den Segmenten wurden an den Enden der etwa 10 cm langen Fasern gemessen. Es wurden ca. 19 Photonen/MeV registriert.

Im Rahmen des ECFA/DESY Workshops wurden noch weitere Arbeiten durchgeführt. Diese waren:

- Studien der Zwei-Fermion-Produktion bei hohen Energien und Interpretation im Rahmen neuer Physik,
- Studie von Stop und Sbottom Produktion im Rahmen supersymmetrischer Modelle,
- Pflege der Detektorsimulationsprogramme BRAHMS und SIMDET,
- Beteiligung an einer Studie zur Komplementarität von TESLA mit dem LHC,
- Studien zur Messung der starken elektroschwachen Symmetriebrechung bei TESLA,
- Studien zur Optimierung der Vorwärts-Spurkammer im TESLA Detektor,
- Untersuchungen zur Messung der Strahlpolarisation,
- Koordination der Arbeitsgruppe zur elektroschwachen Physik in der ECFA Studie.

Neutrino-Astrophysik

Die Neutrino-Astrophysik-Gruppe arbeitet in Projekten an zwei Standorten: am Südpol und am Baikalsee. Das Schwergewicht der Aktivitäten liegt bei AMANDA, dem Neutrino-Teleskop am Südpol, und bei seinem Folgeprojekt, dem IceCube-Teleskop. Der andere Detektor ist NT-200 im sibirischen Baikalsee. AMANDA und NT-200 sind die zur Zeit mit Abstand größten Neutrino-Teleskope. Durch ihre geographisch komplementäre Lage und die unterschiedliche Methodik ergänzen sie sich. Neben der Arbeit an den Neutrino-Projekten wurde innerhalb der Gruppe im Jahre 2003 die Analyse der mit dem L3-Cosmics Experiment genommenen Daten zu Ende geführt.

Das hauptsächliche Nachweisprinzip von Teleskopen für hochenergetische Neutrinos besteht in der Registrierung und Identifizierung von aufwärts laufenden Myonen oder von isolierten Teilchenschauern („Kaskaden“). Unterwasser-Teleskope bestehen aus einer gitterförmigen Anordnung von Photomultipliern (PMs), mit deren Hilfe das Cherenkov-Licht der Teilchen registriert wird. Gemessen werden Ankunftszeit (mit einer Genauigkeit von 1–5 ns) und Stärke der Lichtsignale, woraus Richtung und Energie der Teilchen rekonstruiert werden können.

AMANDA

Die PMs von AMANDA sind tief in dem 3 km dicken antarktischen Eisschild installiert. Der im Januar 2000 vollendete AMANDA-II Detektor besteht aus 19 Trossen („Strings“). AMANDA-II hat eine effektive Fläche von $25\,000\text{ m}^2$ für 1-TeV-Myonen und ist damit etwa 25 mal so sensitiv wie die größten unterirdischen Neutrino-Detektoren.

Die Resultate der 1997 mit einem Teildetektor genommenen Daten sind vollständig publiziert. Nachdem 2002 die Daten der Jahre 1998, 1999 und 2000 bearbeitet (gefiltert, nachgeeicht, rekonstruiert) und analysiert wurden, stand 2003 die Bearbeitung der Daten von 2001 und 2002 im Vordergrund. Parallel zu der jahresweisen Bearbeitung (2001 in Madison, 2002 in Mainz) hat die Zeuthener Gruppe eine standardisierte Bearbeitung aller vier Jahre 2000–2003 in Angriff genommen. Zeuthen war

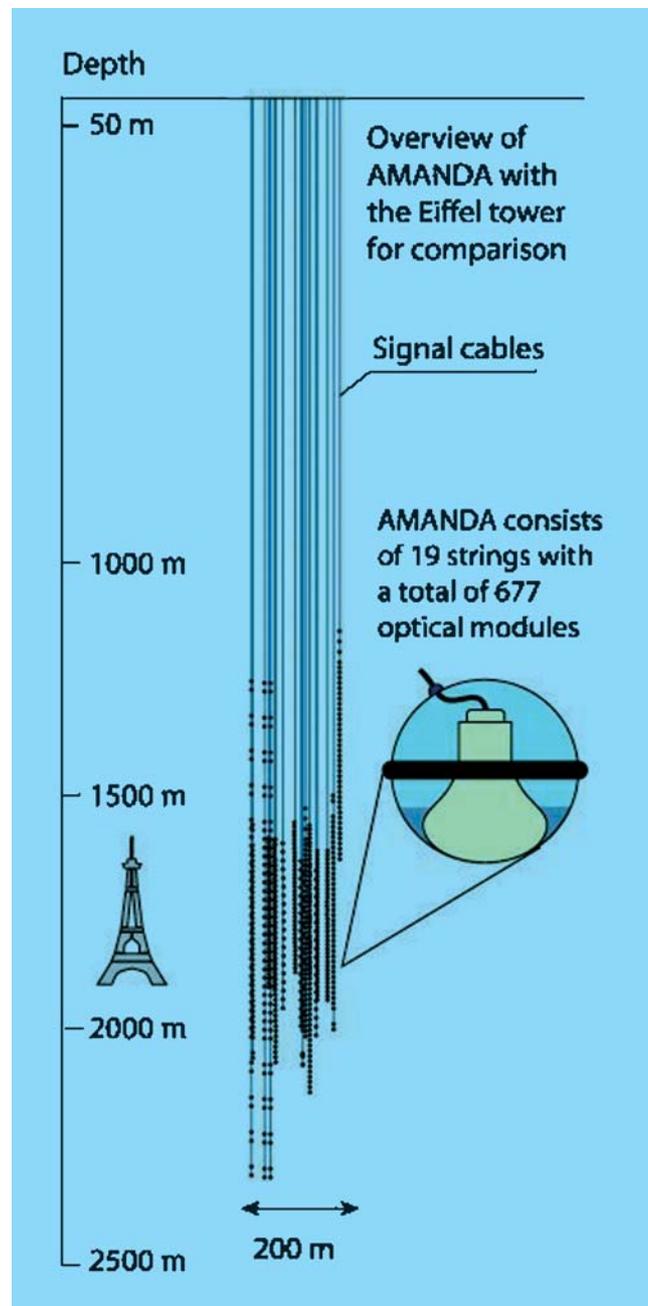


Abbildung 81: Der AMANDA Detektor am Südpol.

auch für die volle Prozessierung der 2000er Daten zuständig.

Die Analyse der 2000er Daten hat bisher zu zwei abgeschlossenen Analysen geführt: die eine (Suche nach Punktquellen) durch DESY und Madison, die andere

(Suche nach einem Überschuss hochenergetischer Kaskaden) durch DESY allein.

Die Grenze für den differentiellen Fluss von Myon-Neutrinos aus extraterrestrischen Punktquellen (gemittelt über die nördliche Hemisphäre) beträgt $dF/dE \cdot E^2 \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Dieses Limit liegt nahe an realistischen Vorhersagen für Neutrinoflüsse von Mikroquasaren. Es liegt außerdem gleichauf mit den Neutrinoflüssen, die man aus einigen nachgewiesenen TeV Gamma-Quellen erwarten würde, vorausgesetzt sie hätten die gleiche Stärke am Quell-Ort wie die Gamma-Flüsse. Ausgedrückt als Neutrinofluss oberhalb von 1 TeV ergibt sich ein Limit von $\sim 5 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Diese Grenze lässt sich mit den Gamma-Obergrenzen vergleichen, die Beobachtungen mit dem Milagro-Detektor (USA) ergeben haben. Die AMANDA Neutrino-Grenzen liegen unter den Milagro Gamma-Grenzen.

Die Grenze für den diffusen extraterrestrischen Fluss hochenergetischer Neutrinos, die sich aus der Kaskaden-Analyse ergibt, liegt bei $dF/dE \cdot E^2 \sim 4 \cdot 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, bezogen auf Elektronneutrinos alleine, und bei $9 \cdot 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, bezogen auf alle drei Flavours. Das ist ein Faktor vier unterhalb der sogenannten γ -bound, schließt im Vergleich zu den Resultaten vom Vorjahr einige weitere theoretische Modelle aus und markiert einen signifikanten Schritt in physikalisches Neuland. Die Grenze liegt darüber hinaus um 2.5 mal niedriger als die Grenzen an den diffusen Fluss, die sich aus der Analyse der Muon-Daten des Jahres 1997 ergeben hatten. Abbildung 82 zeigt die erwähnten Grenzen zusammen mit derjenigen, die im Baikal-Experiment erhalten wurde.

Weitere Analysen mit 2000er Daten (Energiespektrum atmosphärischer Neutrinos, Suche nach Myon-Spuren von diffus einfallenden extraterrestrischen Neutrinos, Suche nach Neutrinos aus Gamma Ray Bursts) befinden sich in der Endphase der Analyse und sollen 2004 publiziert werden. Ebenfalls zu erwähnen ist die Suche nach Myonen, die von Neutrinos aus der Annihilation von WIMPs (Weak Interacting Massive Particles – Kandidaten für die dunkle Materie) im Erdinneren oder in der Sonne entstanden sind. Grenzen an den Fluss solcher Myonen schränken die Anzahl von supersymmetrischen (SUSY) Modellen ein, die die dunkle Materie durch Neutralinos, die leichtesten SUSY-Teilchen, er-

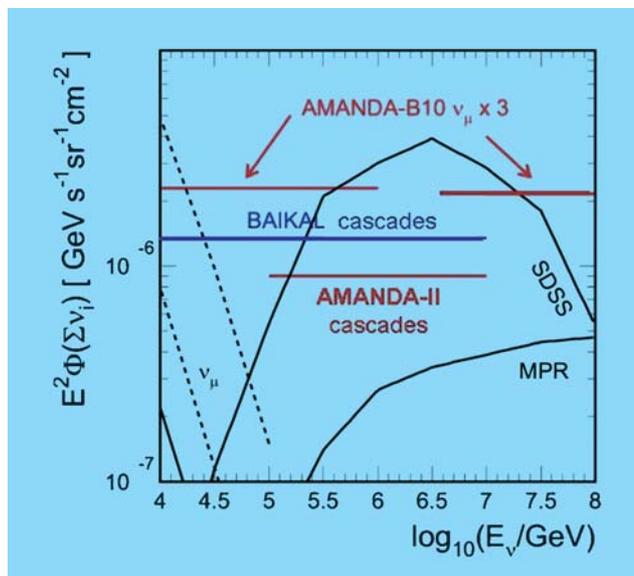


Abbildung 82: Obere Grenzen an den Fluss extraterrestrischer hochenergetischer Neutrinos. Die Grenzen beziehen sich auf den Fluss aller 3 Neutrinosorten. Die aus einer reinen Myon-Neutrino-Analyse der 1997er Daten gewonnenen Obergrenzen wurden darum mit einem Faktor 3 multipliziert („AMANDA-B10 $\nu_\mu \times 3$ “). Der untere Energiebereich wird durch eine Analyse abgedeckt, die nach aufwärts laufenden Myonen sucht, der obere Energiebereich durch eine Analyse, die auf sehr energiereiche Myonen aus der oberen Hemisphäre zugeschnitten ist. Die Kaskadenanalyse (siehe Text) ist auf alle 3 Neutrino-Sorten sensitiv. Sie basiert auf den 2000er Daten des AMANDA-II Teleskops. Die Energiebänder aller drei Ausschlussbereiche ergänzen sich. Das Baikal-Limit liegt zwischen den erwähnten AMANDA-Obergrenzen.

klären. Das Limit für solche Myonen aus dem Erdzentrum beträgt $1 \cdot 10^3 \text{ km}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$. Es ist zwar von der gleichen Größenordnung wie ähnlich gewonnene Grenzen aus Untergrunddetektoren, schließt jedoch weit weniger SUSY-Modelle aus, als direkte Suchmethoden, die Wechselwirkungen der WIMPs selbst nachzuweisen versuchen. AMANDA's Sensitivität für Myonen aus der Sonne ist einerseits schlechter $\sim 3 \cdot 10^3 \text{ km}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$; aufgrund der großen Masse der Sonne und wegen ihrer Spin-Komposition engt das erwartete Limit aber andererseits die SUSY Modelle stärker ein als das für Myonen aus dem Erdinneren, und es kann durchaus mit direkten Suchmethoden konkurrieren. Die Suche

nach Myonen aus der Richtung der Sonne wurde erst mit AMANDA-II möglich, da diese am Südpol immer aus Richtungen nahe am Horizont kommen und mit den vorhergehenden Ausbaustufen nicht genügend gut rekonstruierbar waren. Auch dieses Ergebnis soll 2004 publikationsreif sein.

2003 wurde auch die Analyse der Daten abgeschlossen, die 1997 und 1998 mit den kombinierten Detektoren AMANDA-B10 und SPASE (South Pole Air Shower Array) gewonnen wurden. Das eine wesentliche Resultat dieser Analyse besteht in der Richtungseichung von AMANDA durch SPASE. SPASE registriert mit etwa 1° Genauigkeit die Richtung von Luftschauern, die dann mit der Richtung von durch AMANDA registrierten Myonen aus den gleichen Schauern verglichen wird. Es ergibt sich eine Genauigkeit von 3.5° (Median) und ein Offset von 1° . Die noch nicht publizierte Analyse für AMANDA-II resultiert in Werten von 2° bzw. 0.5° . Das zweite wesentliche Ergebnis besteht in der Bestimmung der „chemischen Zusammensetzung“ der kosmischen Strahlung im Bereich des Knies bei 10^{15} – 10^{16} eV. Die SPASE-AMANDA-Analyse bestätigt den Befund eines wachsenden mittleren Nukleargewichtes beim Übergang zu höheren Energien, der von den meisten Experimenten berichtet wird.

Die wichtigste Aktivität der Zeuthener Gruppe neben der Analyse bestand in einer grundlegenden Überarbeitung der AMANDA-Rekonstruktionssoftware. Die neue Software ist objektorientiert, umfasst mehr Optionen, ist komfortabler und weitaus schneller. Eine reduzierte Version dieser Software ist in der Saison 2003/04 am Pol installiert worden. Die volle Software soll für die Datenanalyse ab Mitte 2004 zur Verfügung stehen.

IceCube

Vorhersagen für die Neutrino-Flüsse aus astrophysikalischen Objekten wie Aktiven Galaxien oder Gamma Ray Bursts legen die Notwendigkeit für Detektoren von der Größenordnung eines Kubikkilometers nahe. Die Sensitivitätsgrenze solcher Detektoren für diffuse Flüsse liegt mit $dF/dE \cdot E^2 \sim 0.3 \cdot 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ unterhalb konservativer theoretischer Limits. Punktquellen, deren Neutrino Flüsse zehnfach schwächer sind als die TeV-Gamma-Flüsse der Aktiven Galaxie Markarian-501, könnten identifi-

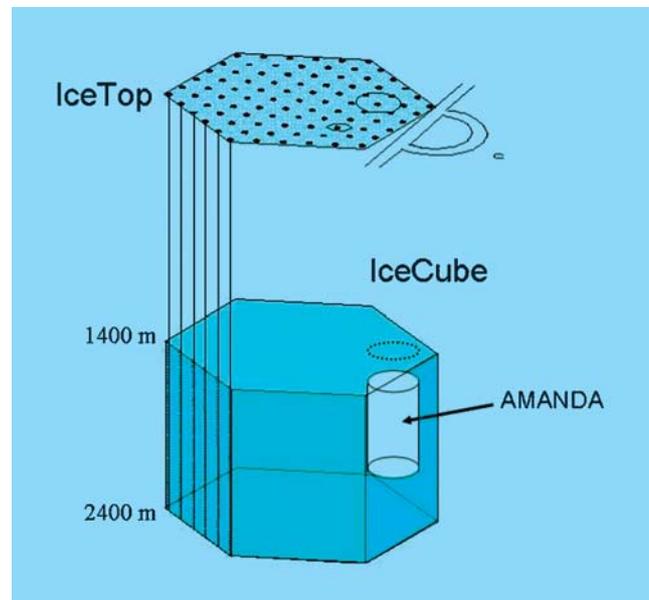


Abbildung 83: Konfiguration von IceCube und AMANDA (unter Eis) und IceTop und SPASE (Oberfläche).

ziert werden. Die Grenzen auf magnetische Monopole würden um einen Faktor Hundert verbessert.

Der geplante IceCube-Detektor soll aus 4800 PMs an 80 Strings bestehen, bei 125 m Stringabstand und 16 m Abstand zwischen den PMs entlang eines Strings. AMANDA-II soll in IceCube integriert werden. IceCube wird ergänzt durch IceTop (Abb. 83). IceTop besteht aus großen Tanks, die mit Eis gefüllt sind. Beim Durchgang von Teilchen aus Luftschauern wird Cherenkov-Licht erzeugt. Für IceTop werden weitere 360 PMs benötigt.

Die PM-Information wird im optischen Modul digitalisiert und dann über elektrisches Kabel an die Oberfläche übertragen. Dieses Konzept wird DOM (Digitaler Optischer Modul) genannt. Der gegenwärtige Plan sieht vor, 2–4 Strings in der Saison 2004/05 zu installieren. Diese Saison dient gleichzeitig als Technologietest für die neue Heißwasser-Bohranlage. In den Folgejahren sollen dann bis zu 16 Strings pro Jahr installiert werden, so dass der Detektor im Jahre 2009/2010 fertig gestellt sein kann.

Die Zeuthener Gruppe hat im IceCube-Projekt folgende Schwerpunktaufgaben übernommen:

- In Zusammenarbeit mit den Universitäten in Mainz und Wuppertal werden in Zeuthen 1300 DOMs montiert und getestet,
- Bereitstellung von magnetischen Abschirmungen für alle 5200 Module (in Zusammenarbeit mit dem ITEP Moskau),
- Entwicklung des Empfangsteils der DOMs an der Oberfläche (DOR – Digital Optical module Readout und DSB – Data Synchronization Board),
- DESY Zeuthen wird als europäisches Zentrum für die Massenprozessierung von experimentellen wie auch von Monte-Carlo-Daten und als deutsches Analysezentrum dienen,
- Die Zeuthener Gruppe leistet wesentliche Beiträge zur Software-Entwicklung für IceCube,
- Entwicklung von Wellenlängen-Schiebern zur Erhöhung der Sensitivität der optischen Module im UV-Bereich,
- Untersuchung der Möglichkeit, höchstenergetische Neutrinos durch akustische Methoden nachzuweisen.

Im Jahr 2003 wurde die Infrastruktur zur Montage und zum Test der optischen Module aufgebaut. Dazu gehört an erster Stelle ein 25 m² großer Dunkelraum, in dem die optischen Module bei -42° C einem Langzeittest unterworfen werden, weiterhin Räume für das Eingießen der Photomultiplier in die Glaskugeln, zur Montage der Elektronikboards und für einfache Funktionstests. Die ersten 300 magnetischen Abschirmungen wurden produziert (Abb. 84).

Der Zustand der Empfangselektronik wird im Bericht der Elektronikgruppe zusammengefasst.

Wellenlängen-Schieber (WLS) sollen zur Erhöhung der Sensitivität der optischen Module von IceCube eingesetzt werden. Das Glas der Druckkugeln, die die PMs beherbergen, ist unterhalb von 330 nm kaum lichtdurchlässig. Da antarktisches Tiefeneis im Gegensatz zu Wasser bis etwa 230 nm herab transparent ist, stellen die Glaskugeln die wesentliche Begrenzung beim Nachweis des kurzwelligen Anteils von Cherenkov-Licht dar. Um diese Begrenzung zu umgehen, sollen die Kugeln eine Kappe aus durchsichtigem Plastikmaterial erhalten, die mit WLS versetzt ist. Im Jahre 2003 ist dabei ein technologischer Durchbruch gelungen: WLS

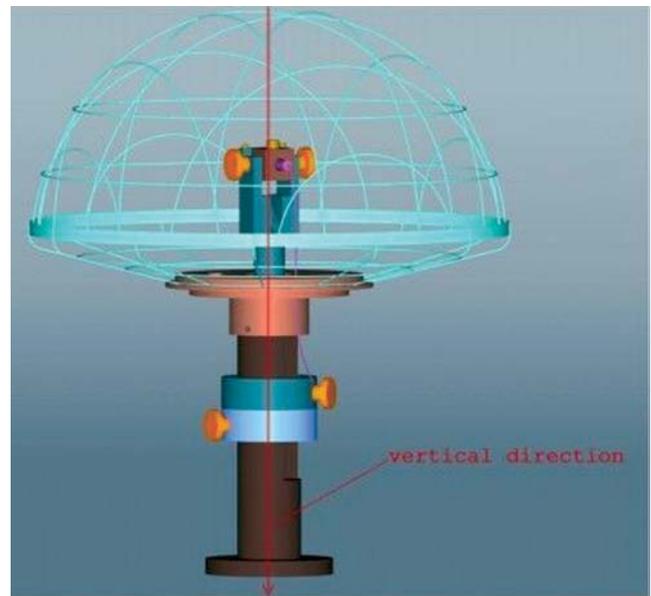


Abbildung 84: Mu-Metall Abschirmung für die IceCube PMs.

und Plastikmaterial konnten granuliert, zu dünnen Platten extrudiert und thermisch geformt werden. Es wird abgeschätzt, dass mit solchen Kappen bis zu 30% mehr Licht gesammelt werden kann. Wie groß der Effekt für das gesamte System „WLS-Glaskugel-Gel-PM“ ist und ob er bei -42°C ebenso effizient funktioniert, soll 2004 im Zeuthener Tiefkühl-Laborraum untersucht werden. Der endgültige Funktionsbeweis wäre ein in-situ Test am Südpol mit einigen der ersten optischen Module, die 2004/05 installiert werden.

Der akustische Nachweis von Teilenschauern aus Neutrino-Reaktionen soll den optischen Nachweis bei Energien oberhalb ~ 100 PeV ergänzen. Im Jahr 2003 wurden in Zeuthen verschiedene piezoelektrische Sensoren, Transmitter und Signalfilter entwickelt. Der akustische Effekt von Teilenschauern wurde am 180-MeV-Protonbeschleuniger in Uppsala verifiziert, wobei die Vielzahl geladener Teilchen in einem PeV-Schauer durch eine entsprechend hohe Zahl von Beam-Protonen simuliert wurde. Die Signalfortpflanzung über kurze Distanzen wurde im Labor (Eis und Wasser) und im Zeuthener See untersucht. Signalfortpflanzung und Umgebungsruschen wurden ebenfalls im Baikalsee gemessen. Im Jahre 2004 sollen diese R&D-Arbeiten fortgeführt und eine Testanordnung von 2–6 Kugeln

mit akustischen Sensoren vorbereitet werden, um dann in der antarktischen Saison 2004/2005 am Pol getestet werden zu können.

Das Baikal-Experiment

Der Machbarkeitsbeweis für Neutrino teleskope unter Wasser wurde durch das Baikal-Experiment erbracht. Im März/April 1993 wurde die weltweit erste Anordnung von 36 PMs an drei Trossen installiert und Myon-Spuren räumlich rekonstruiert. Mit diesem Detektor wurden auch die ersten 2 aufwärts laufenden Myonen und damit die ersten Neutrino kandidaten identifiziert. Seit 1998 umfasst das Baikal-Teleskop 192 Photomultiplier an 8 Trossen (NT-200). Die Energieschwelle liegt bei etwa 10 GeV.

Obwohl viel kleiner als AMANDA, erreicht das Baikal-Teleskop für einige Untersuchungen fast ähnliche Sensitivitäten und kann daher wichtige, mit teilweise komplementären Suchstrategien erhaltene Ergebnisse liefern. Die Suchstrategie für Kaskaden z. B. zielt nicht auf Ereignisse im Detektor selbst ab, sondern auf elektromagnetische oder hadronische Schauer in einem sehr großen Volumen unterhalb des Detektors. Dieses Volumen ist um ein Vielfaches größer als das geometrische Detektorvolumen. Eine solche Strategie ist nur in Wasserdetektoren mit ihrer geringen Lichtstreuung, nicht aber im antarktischen Eis möglich. Aus der Nichtbeobachtung von quasi-punktförmigen Ereignissen mit hoher Lichtemission „von unten“ konnte eine obere Grenze für den Fluss hochenergetischer, diffus eintreffender Neutrinos aus Quellen mit einem E^{-2} -Spektrum zu $dF/dE \cdot E^2 < 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ abgeleitet werden (siehe auch Abbildung 82). Dieses Limit wurde aus der Analyse der Daten von 1998/99 gewonnen und erreicht bis auf einen Faktor 1.5 das AMANDA-Limit aus den 2000er Daten.

Die Kollaboration plant die Sensitivität auf diffuse Flüsse um einen Faktor Vier zu verbessern. Das soll durch einen moderaten Ausbau um nur 32 PMs an drei Strings geschehen, die in einem Abstand von 70 Metern zu NT-200 angeordnet sind. Dieser NT200+ genannte Detektor wird zusammen mit AMANDA die Grenzen für diffus einfallende Neutrinos verbessern und als Kontroll-Experiment im Falle eines positiven Befundes bei AMANDA dienen können. Ehe voraussichtlich im Jahre 2006 das ANTARES Teleskop im Mittel-

meer seinen vollen Betrieb aufnimmt, erfüllt daher das Baikal-Teleskop eine äußerst wichtige Rolle. DESY's Beitrag zu NT-200+ besteht im Bau eines Unterwasser-Lasermoduls. Die Nanosekunden-Impulse dieses Lasers dienen der Zeiteichung der PMs an den drei neuen Strings. Darüber hinaus muss die Datenübertragung zum Ufer vereinfacht werden, um den erhöhten Datenfluss zu ermöglichen. Dazu ist geplant, Industrie-PCs unter Wasser zu installieren. Auch an dieser Entwicklung ist die Zeuthener Gruppe beteiligt. In der folgenden Saison (März/April) müssen jedoch zuerst zwei der vier Uferkabel ausgewechselt werden, die durch Elektro-Korrosion ausgefallen sind. Dadurch war ab April 2003 nur eine eingeschränkte Datennahme mit 5 von insgesamt 8 Strings möglich.

Unweit des Baikal-Experiments wird im Tunka-Tal ein Luftschauerdetektor betrieben, der aus 29 nach oben gerichteten Photomultipliern besteht (25 PMs vom QUASAR-Typ mit 25 cm Durchmesser, 4 EMI PMs mit 8" Durchmesser). DESY hat vor einigen Jahren die EMI-PMs samt optischer Auslese und FADCs beigetragen. Mit dem TUNKA-Detektor werden Energiespektrum und chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung im Energiebereich 10^{14} – 10^{16} eV in einer zu SPASE-AMANDA oder zu dem Karlsruher Experiment KASKADE komplementären Art gemessen. Ein Ausbau unter Benutzung von ehemals in EAS-Top (Gran-Sasso) eingesetzten Photomultipliern ist in Vorbereitung. Ein Subdetektor dieser Art könnte in einen zukünftigen Luftschauer-Detektor AUGER-Nord integriert werden und dessen Sensitivität zu Energien unterhalb 10^{18} eV erweitern.

L3+Cosmics

L3 war eines der vier Speicherringexperimente am CERN. Das Experiment L3+Cosmics benutzt das Myon-Spektrometer von L3 und einen 200 m^2 großen zusätzlichen Szintillationsdetektor für die Zeitmessung von Myonen aus Luftschauern. In den Jahren 1999 und 2000 wurden insgesamt 11 Milliarden Myonen registriert. Die Auswertung dieser Daten wurde im Jahr 2003 fortgesetzt und für wichtige Themen nahezu abgeschlossen. Vorläufige Resultate wurden in sieben Beiträgen auf der ICRC in Japan präsentiert.

Wichtigstes Ergebnis des Experiments (Dissertation M. Unger, Zeuthen) ist die Präzisionsmessung des atmo-

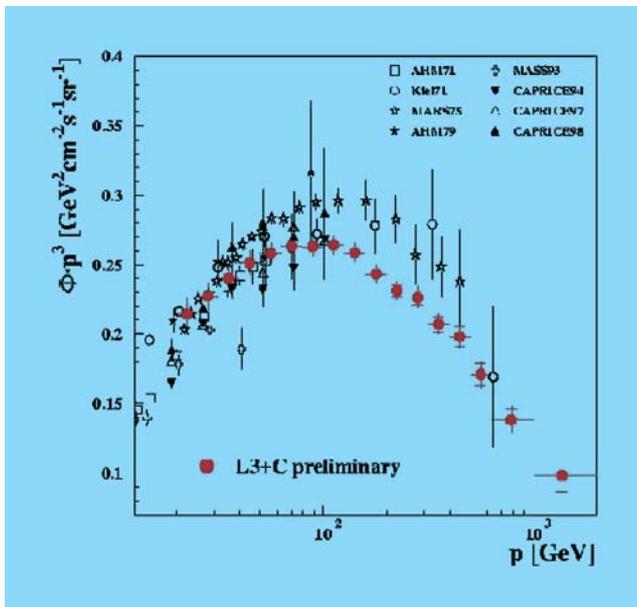


Abbildung 85: Impulsspektrum atmosphärischer Myonen, gemessen im L3+Cosmics-Experiment.

sphärischen Myonflusses im Impulsbereich von 20 bis 2000 GeV/c und für Zenithwinkel von 0 bis 58 Grad (Abb. 85).

Theoretische Elementarteilchenphysik

Theoretische Untersuchungen wurden auf den Gebieten der störungstheoretischen Quantenfeldtheorie des Standardmodells, der Gitter-Eichtheorie und allgemeiner Aspekte von Quantenfeldtheorien durchgeführt.

Quanten-Chromodynamik

Perturbative Untersuchungen auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung (QCD) befassten sich mit Fragestellungen aus dem Bereich der unpolarisierten und polarisierten tief-inelastischen Streuung. Ein Hauptziel der theoretischen Untersuchungen ist die Bestimmung der starken Kopplungskonstante $\alpha_s(M_Z^2)$ mit höchstmöglicher Genauigkeit aus den tief-inelastischen HERA Daten, ergänzt durch tief-inelastische Daten anderer Experimente. Bei der Berechnung der 3-Schleifen non-singlet und singlet anomalen Dimensionen und Wilson-Koeffizienten wurden weitere Fortschritte er-

zielt [DESY 03-121]. Für große Klassen von Feynman-Diagrammen konnten alle 3-Loop Integrale berechnet werden. Resummationsformeln für die 3-Loop soft-Gluon Effekte wurden abgeleitet. Desweiteren wurden mathematische Untersuchungen zu finiten harmonischen Summen durchgeführt [DESY 03-134] und die shuffle Algebra dieser Objekte abgeleitet. Relationen für die Länge der Basis allgemeiner finiter harmonischer Summen wurden gefunden. Die bis zum Niveau der 3-Loop Wilson-Koeffizienten notwendigen Reduktionsformeln wurden explizit abgeleitet. Die gegenwärtigen Arbeiten konzentrieren sich auf eine weitere Reduktion der Darstellung mit Hilfe funktionaler Relationen. Mit diesem Verfahren wird eine kompakte Darstellung der 2- und 3-Loop Wilson Koeffizienten und der 3-Loop anomalen Dimensionen erreicht werden, was für die Anwendung dieser Größen in Analyseprogrammen von großer Bedeutung ist. Da eine konsistente Lösung der Evolutionsgleichungen und die Darstellung der Strukturfunktionen nur mit Hilfe der sog. Mellin-Raum Evolution möglich ist, war es notwendig, auch die Wilson-Koeffizienten für die Produktion schwerer Quarks in dieser Darstellung bis zu den NLO Korrekturen präzise zu berechnen [DESY 03-204].

Erstmals wurden die schweren Quark Korrekturen zur polarisierten Strukturfunktion $g_2(x, Q^2)$ berechnet [DESY 03-049]. Es erweist sich, dass auch in diesem Fall die Wandzura-Wilczek Relation erfüllt ist. Diese Korrekturen sind für die konsistente Analyse der polarisierten tief-inelastischen Streuung bei transversaler Polarisation von Bedeutung.

Bisher ist ungeklärt, warum der Messwert für den schwachen Mischungswinkel bei NUTEV von anderen Präzisionsmessungen abweicht. QCD Korrekturen könnten hierfür verantwortlich sein. In einer Analyse der Paschos-Wolfenstein Relation wurde der Effekt der NLO und NNLO QCD Korrekturen unter Berücksichtigung kinematischer Schnitte abgeschätzt [DESY-PROC-2003-01].

Weitere Arbeiten befassten sich mit der Lepton-Helizitätsverteilung im Drell-Yan Prozess und den 2-Loop Korrekturen zur Quark-Gluon und Gluon-Gluino Streuung [DESY 03-034] an Hadron-Collidern.

Die QED Korrekturen in $O(\alpha^2 \ln(Q^2/m_e^2))$ für die tief-inelastische Elektron-Nukleon Streuung wurden nume-

risch berechnet [hep-ph/0309135]. Desweiteren wurden Berechnungen von QED Korrekturen in höherer Ordnung für die e^+e^- -Annihilation durchgeführt.

Elektro-Schwache Theorie

Die Untersuchungen der elektro-schwachen Korrekturen zur massiven Fermion-Paarzeugung bei Giga-Z und TESLA wurden fortgesetzt und auch die Bhabha-Streuung einbezogen (hep-ph/0302259, hep-ph/0307132). Die Berechnungen dazu wurden mit der Entwicklung des Programmpakets qgraph/DIANA/aITALC weitgehend automatisiert. Das Fortran-Paket topfit wurde in ein Monte-Carlo-Programm zur Beschreibung der Top-Paarproduktion bei TESLA eingebunden (hep-ph/0311097).

Die Berechnungen von virtuellen photonischen Ein- und Zweischleifenkorrekturen zur Bhabha-Streuung sind fortgesetzt worden. Die Matrix-Elemente können durch ein weitgehend automatisiertes Programm durch skalare Funktionen ausgedrückt werden, deren Darstellung durch einige wenige Masterintegrale und deren numerische Berechnung noch aussteht.

Berechnungen zur Resummation von Sudakov-Logarithmen in der elektroschwachen Theorie auf zwei-Schleifen-Niveau wurden abgeschlossen [DESY 03-021].

Eine genauere indirekte Bestimmung der Higgsmasse aus Präzisionsdaten von LEP ist immer noch ein wichtiges Thema, auch im Hinblick auf zukünftige Beschleunigerprojekte. In dem Zusammenhang konnte die komplette Berechnung der Zweischleifenkorrekturen zur Voraussage der W Masse im Standardmodell abgeschlossen werden (DESY 03-184). Das Resultat stellt einen Meilenstein in den Präzisionsvorhersagen in der elektroschwachen Theorie dar.

Eine Reihe von theoretischen Arbeiten (DESY 02-155, DESY 03-023, DESY 03-155) brachten wesentliche Verbesserungen in der Berechnung des Pion Formfaktors und der Vorhersage des anomalen magnetischen Moments des Muons.

Eine vollständige Zweischleifenrechnung der Renormierungskonstanten im Standardmodell konnte im wesentlichen abgeschlossen werden [DESY-02-214, DESY-02-156, DESY 03-112]. Dazu wurden auch neue

numerische Verfahren entwickelt, welche es erlauben, Beiträge von tausenden von Diagrammen effizient und numerisch stabil zu berechnen.

Beim Projekt, Strahlungskorrekturen zu Hochenergieprozessen mit 5 oder mehr beteiligten schweren Teilchen auf den Einschleifenniveau komplett zu berechnen, konnte ein wichtiger technischer Durchbruch erzielt werden: die exakte Berechnung der Einschleifen-Integrale bei beliebigen komplexen Massen in beliebiger Raumzeit-Dimension und vor allem für beliebige Kinematik (DESY 03-033). Die Berechnung von Amplituden im unphysikalischen Bereich, welche in solchen Rechnungen auftreten, war bisher eine wesentliche Hürde bei der Durchführbarkeit.

Gitter-Eichtheorie

Eine wichtige neue Entwicklung der Gitter-Eichtheorie-Gruppe ist die nichtperturbative Formulierung der „Heavy Quark Effective Theory“ [hep-lat/0310035]. Ihre Langzeitperspektive ist eine systematische Berechnung der Eigenschaften (Matrixelemente) von B-Mesonen als Potenzreihe in der inversen b-Quarkmasse. Die Koeffizienten dieser Reihe können im Kontinuumslimes der Gittertheorie berechnet werden [hep-lat/0310035]. B-Mesonen Matrixelemente sind für das Verständnis der CP-Verletzung und die Bestimmung der sogenannten CKM Matrix von größter Bedeutung. Um die theoretische Formulierung auch für die praktische Monte-Carlo-Berechnung zu erschließen wurde eine alternative Diskretisierung der Heavy Quark Effective Theory entwickelt, in der statistische Fehler deutlich reduziert sind [hep-lat/0307021]. Eine Präzisionsberechnung steht aufgrund dieser Entwicklung sowie aufgrund der nun bekannten Renormierung des Axialstroms in der effektiven Theorie [hep-lat/0302019] unmittelbar bevor [hep-ph/0309320, hep-lat/0309074]; die praktische Anwendung ist jedoch vorläufig auf die quenched Approximation beschränkt.

Realistischere Berechnungen erfordern die Monte-Carlo-Simulation unter Einbeziehung dynamischer Quarks. Als ein Schritt in diese Richtung wurden verschiedene Algorithmen mit guter Statistik verglichen [hep-lat/0307008] und die Genauigkeit in der Berechnung der Energieabhängigkeit der Quarkmassen verbessert [hep-lat/0309072]. Unglücklicherweise zeigt

ten sich deutliche Diskretisierungsfehler in der bisher bevorzugten Formulierung dynamischer Quarks [hep-lat/0309171], wenn man Gitterabstände der Größenordnung von 0.1 fm verwendet. Dies war für die Berechnung der Energieabhängigkeit der Quarkmassen und der renormierten Kopplung nicht nötig. Bevor man jedoch den Niederenergiesektor der QCD mit Zuversicht untersuchen kann, muss eine bessere Formulierung gefunden werden, die es erlaubt, auch Gitterabstände von 0.1 fm zu verwenden. In diesem Zusammenhang wurde auch die Diskretisierung des Eichsektors untersucht [hep-lat/0309017]. Trotz der beschriebenen Probleme in der Theorie mit dynamischen Quarks wurden schon Methoden zur Renormierung des Axialstroms weiterentwickelt [hep-lat/0309071, hep-lat/0309169]. Weiterhin wurden analytische Berechnungen von Effekten des endlichen Volumens durchgeführt [hep-lat/0311023] und alternative Diskretisierungen dynamischer Fermionen in einem einfachen 2-dimensionalen Modell untersucht.

Allgemeine Feldtheorie

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Liouville-Theorie wurden fortgesetzt. Die Reflektionsamplitude der Liouville-Theorie wurde mit Hilfe der Operator-Methode abgeleitet. Die Korrelations-Funktionen für die Vertex-Operatoren mit negativ-ganzzahligen Exponentials des periodischen Liouville-Feldes wurden berechnet und der allgemeine Fall abgeleitet, in welchem diese als Distributionen fortgesetzt wurden. Die auf dem Pfad-Integral beruhenden Vermutungen von Dorn und Otto stellten sich als nur bedingt realisiert heraus. Integraldarstellungen für die generischen Vertex-Operatoren wurden formuliert. Diese zeigen Strukturen, die zur Liouville S-Matrix Theorie in Beziehung stehen [hep-th/0311202].

Konferenzen

An der Organisation folgender Konferenzen bei DESY waren im Jahr 2003 Mitglieder der Theoriegruppe beteiligt:

- Electroweak Precision Data and the Higgs Mass (F. Jegerlehner, P. Zerwas),
- Physics in Collision (F. Jegerlehner).

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte

Im Berichtszeitraum arbeitete der Bereich Theorie in drei TMR-Netzwerken der Europäischen Union mit. Dies sind: 1) Hadron Phenomenology from Lattice QCD, 2) Particle Physics Phenomenology at High Energy Colliders und 3) EURIDICE: European Investigations on Dafne and other International Collider Experiments using Effective Theories of Colors and Flavours from the Phi to the Upsilon. Das Deutsch-Georgische Kooperationsprojekt ‚Integration und Quantisierung nicht-nilpotenter geeichter Wess-Zumino-Novikov-Witten konformer Feldtheorien‘ wurde von der DFG unterstützt. Die ALPHA Kollaboration, an der Wissenschaftler der Universitäten HU Berlin, Münster, Milano, RomII, Madrid und der Institute CERN und DESY in Hamburg beteiligt sind, wird von DESY Zeuthen koordiniert. Es besteht eine enge Zusammenarbeit der Theoriegruppe mit Instituten für Theoretische Physik am Harish Chandra Research Institute Allahabad/IN, dem KEK Tsukuba/J, dem NIKHEF, Amsterdam/NL, der Humboldt-Universität Berlin, der Universitäten Bielefeld, Cottbus, Hiroshima/J, Leiden/NL und Leipzig.

Der Bereich Theorie ist am Graduiertenkolleg ‚Strukturuntersuchungen, Präzisionstests und Erweiterungen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik‘ (HU Berlin, FU Berlin, DESY Zeuthen, TU Dresden, MPI Potsdam) beteiligt.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat den Sonderforschungsbereich/Transregio SFB/TR-09 ‚Computer-gestützte Theoretische Teilchenphysik‘ mit Projektbeginn am 01.01.2003 genehmigt. Beteiligt sind Gruppen aus der RWTH Aachen, der HU Berlin, der TU Karlsruhe und die Theoriegruppe von DESY Zeuthen als Antragsteller mit J. Blümlein, F. Jegerlehner, R. Sommer und T. Riemann sowie K. Jansen von NIC.

APE Projekt – Entwicklung von Parallelrechnern

Die Theorie zur Beschreibung der Eigenschaften der Starken Kraft, die Quantenchromodynamik (QCD), kann oftmals nur schwer quantitativ überprüft werden.

Es bleibt daher bis heute eines der großen Herausforderungen der theoretischen Teilchenphysik, die Größen, die im Experiment gemessen werden können, ausgehend von den Grundgleichungen dieser Theorie zu berechnen. Numerische Simulationen auf einem diskretisierten Raum-Zeit-Gitter bieten eine (und oftmals die einzige) Möglichkeit, um eben jene Größen genau zu berechnen, die für die Interpretation von experimentellen Messungen benötigt werden.

DESY Zeuthen bietet über das John von Neumann Institute for Computing (NIC) Wissenschaftlern die Möglichkeit derartige Simulationen auf massiv parallelen Spezialrechnern vom Typ APEmille durchzuführen. Diese Rechner sind speziell für solche Anwendungen optimiert und wurden vom Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Zusammenarbeit mit DESY entwickelt.

Die jetzige Installation umfasst über 1.000 Prozessoren, die zusammen mehr als 500 Milliarden Gleitkomma-Operationen pro Sekunde durchführen können. Der Datenaustausch zwischen den Prozessoren erfolgt über ein leistungsfähiges synchrones Netzwerk. Ein Verbund von 32 marktüblichen PCs, die mit dem Betriebssystem Linux operieren, ermöglicht den Zugriff auf die Rechner. Die aktuellen Systeme haben sich im täglichen Betrieb als äußerst stabil und zuverlässig erwiesen.

Die beachtliche Rechenleistung von APEmille wird jedoch in Zukunft nicht mehr ausreichen, um international konkurrenzfähige Großforschungsprojekte durchführen zu können. DESY bemüht sich daher, die in diesem Bereich tätigen Forscher, d. h. die potentiellen Nutzer zukünftiger Systeme, im Lattice Forum zusammenzubringen, um eine möglichst effiziente Nutzung zukünftiger Rechnerinstallationen zu gewährleisten. Ziel ist es, den geschätzten Rechenleistungsbedarf mit Hilfe einer neuen Generation von Spezialrechnern, apeNEXT, zu decken. Dieser Rechner wird zur Zeit in einer Zusammenarbeit zwischen INFN, DESY und der Université Paris Sud entwickelt.

Damit eine große Anzahl der neuen Prozessoren ohne Verlust von effektiver Leistung zusammengeschaltet werden können, ist die Kommunikationselektronik auf dem ASIC Chip selbst untergebracht. Dies erlaubt einen sehr kompakten Aufbau des Rechners: insgesamt 16 Prozessoren können auf einem einzigen Mother-board

integriert werden. Da Kommunikation und arithmetische Operationen zudem unabhängig voneinander abgearbeitet werden können, zeichnet sich die neue Architektur dadurch aus, dass der Effizienzverlust durch die parallele Abarbeitung einer Applikation auf hunderten von Prozessoren minimal oder sogar vernachlässigbar ist.

Damit diese hohe Effizienz tatsächlich erreicht wird, sind hohe Anforderungen an die Software zu stellen. Dies gilt insbesondere für die Software zur Übersetzung der in einer Hochsprache programmierten Anwendungen in Maschinenbefehle. Die APE-Gruppe in Zeuthen war federführend bei der Entwicklung zweier Compiler für apeNEXT: für die spezielle Sprache TAO sowie für die auch auf anderen Plattformen weit verbreitete Sprache C. In diesem Jahr hat die APE-Gruppe in Zeuthen für beide Compiler erste Prototypen realisiert.

Im Sommer 2003 haben die beteiligten Forscher die fertigen Schaltpläne des neuen Prozessors an den Chip-Hersteller übergeben. Zuvor hatten die Wissenschaftler der APE-Gruppe in Zeuthen noch einmal die korrekte Funktionalität des gesamten Designs eingehend überprüft sowie die Tests erstellt, die vom Chip-Hersteller für die Selektion der fertigen Prozessoren verwendet werden. Ende November 2003 war es schließlich so weit: die ersten Prototyp-Chips verließen die Fabrik zur Endmontage.

Nun werden sich die Forscher der APE-Gruppen in Italien, Deutschland und Frankreich darauf konzentrieren, den neuen Prozessor gründlich zu testen und mit der Integration größerer Systeme zu beginnen. Ziel ist es, auch in Zeuthen bis Mitte 2004 ein Prototyp-System aufzubauen, welches etwa 800 Milliarden Gleitkomma-Operationen pro Sekunde ausführen kann. Weitere Systeme sind geplant: in Zukunft sollen Wissenschaftler die Möglichkeit haben, bei DESY in Zeuthen ihre Rechnungen mit einer Geschwindigkeit von mehreren Billionen solcher Operationen pro Sekunde (Tera-Flops) durchzuführen.

NIC bei DESY Zeuthen

Das John von Neumann-Institut für Computing (NIC) wird gemeinsam vom Forschungszentrum Jülich und DESY getragen und stellt Forschern, die sich mit wis-

senschaftlichem Rechnen befassen und insbesondere numerische Simulationen durchführen, die hierfür notwendige Rechenleistung zur Verfügung.

Die Forschergruppe Elementarteilchenphysik des NIC ist am DESY Zeuthen beheimatet (<http://www-zeuthen.desy.de/nic/>). Das Forschungsprogramm der NIC-Gruppe konzentriert sich auf Untersuchungen in der Quantenchromodynamik (QCD) als der allgemein akzeptierten Theorie der starken Wechselwirkung. Das Ziel der Forschung ist, mittels ab initio Rechnungen Vorhersagen aus der QCD abzuleiten, ohne auf zusätzliche Approximationen oder Annahmen zurückgreifen zu müssen. Die Hauptmethode, um dieses Ziel erreichen zu können, sind „Computorexperimente“, bei denen in sehr aufwändigen numerischen Simulationen physikalische Größen, die mit dem Experiment zu vergleichen sind, berechnet werden. Dabei werden nur die Gleichungen des zugrunde liegenden physikalischen Modells herangezogen, so dass eine direkte und zweifelsfreie Überprüfung eines gegebenen physikalischen Modells vorgenommen werden kann. Die so berechneten physikalischen Größen sind unmittelbar relevant für die Interpretation experimentell gewonnener Daten.

Forschungsergebnisse

Erst vor kurzer Zeit wurden chiral invariante Formulierungen der QCD auf dem Gitter entwickelt, die konzeptionell erhebliche Vorteile gegenüber traditionellen Formulierungen der Gitter-QCD aufweisen. Die chiral invarianten Formulierungen werden insbesondere im Bereich sehr kleiner realistischer Werte der u - und d -Quarkmassen wichtig. Für Simulationen, die bei Quarkmassen von nur einigen MeV (also sogar noch unterhalb der u - und d -Quarkmassen) gemacht werden, existieren theoretische Vorhersagen, die mit numerischen Resultaten verglichen werden können. So sagt die Theorie der Zufallsmatrizen die Verteilungen der niedriggelegenen Eigenwerte des Gitter-Dirac-Operators voraus und die chirale Störungstheorie das Verhalten der Meson-Korrelationsfunktionen. Durch Vergleich mit diesen Vorhersagen konnte ein Wert für den Ordnungsparameter der spontanen chiralen Symmetriebrechung von $(250 \text{ MeV})^3$ und ein Wert der Pion-Zerfallskonstante von 130 MeV aus ab-initio Rechnungen gewonnen werden. Diese Werte sind mit Ergebnissen aus Pion-Streuungs-Experimenten kompatibel. Die NIC-Gruppe hat

innerhalb der XLF und QCDSF Kollaborationen die ersten realistischen Rechnungen dieser Art durchgeführt und Pionierarbeit geleistet.

Berechnungen von Strukturfunktionen auf dem Gitter sind einer der Schwerpunkte im Forschungsprogramm der NIC-Gruppe. Dabei werden von den Kollaborationen ZeRo und QCDSF sehr unterschiedliche Methoden verwendet. Da die Ergebnisse nach einer Kontinuum-Extrapolation und einer chiralen Extrapolation übereinstimmen müssen, wenn auch die Renormierung nicht-perturbativ erfolgt, ergibt sich so eine Konsistenzüberprüfung und damit die Möglichkeit, systematische Fehler zu kontrollieren. Die bisher untersuchten Größen sind Momente von Partonverteilungsfunktionen. Diese können mittels globaler Analysen aus den experimentellen Daten extrahiert und dann direkt mit Gitterrechnungen verglichen werden. Solche Rechnungen stellen somit einen wichtigen Test insbesondere der nicht-perturbativen Aspekte der QCD dar.

Im letzten Jahr wurden verschiedene Momente für Baryonen und Mesonen berechnet. Dies beinhaltet auch die generalized parton distributions sowie Formfaktoren. Überraschenderweise scheinen die Resultate aus Rechnungen mit dynamischen Fermionen nicht stark von den Valenzquark Rechnungen abzuweichen. Ob dies ein Effekt der relativ großen Quarkmassen ist, die in den Simulationen verwendet werden, ist eine offene Frage. Eine weitere Überraschung war, dass die Effekte des endlichen Volumens sehr groß sind für die relevanten Matrixelemente.

Neben diesen zentralen Schwerpunkten beschäftigt sich die NIC-Gruppe mit einer Reihe weiterer Themen, die hier nur kurz gestreift werden können:

- Für Baryon und Mesonmassen konnten in der chiralen Störungstheorie Formeln für das Verhalten der Massen bei der Variation des endlichen Volumens gewonnen werden. Diese Formeln beschreiben die numerischen Ergebnisse sehr gut.
- Der von Hasenbusch vorgeschlagene Algorithmus zur Simulation dynamischer Quarks wurde weiter verbessert und in realistischen Simulationen getestet. Dabei ergeben sich Faktoren 2–5 als Gewinn gegenüber konventionellen Algorithmen.
- Es wurden erste Simulationen der Vakuumpolarisation auf dem Gitter vorgenommen. Diese Ergeb-

nisse sind von direkter Relevanz für das magnetische Moment im Muon $g-2$ Experiment.

- Bei dem Phänomen des Confinement wird allgemein vermutet, dass Monopole und die Dynamik der Flussschläuche eine zentrale Rolle spielen. Solche Fragen wurden erstmals in dynamischen Simulationen untersucht. Weiter konnte das Verhalten und das Spektrum des Confinement-Strings bei endlicher Temperatur studiert werden.
- Die NIC-Gruppe beteiligt sich auch bei der Untersuchung der HQET, einer effektiven Theorie schwerer Quarks. Hier konnten bedeutende Fortschritte zur Bestimmung von, z. B., $F(B(s))$, einer Zerfallskonstante des B-Mesons, gewonnen werden.
- 5-dimensionale Theorien mit 4-dimensionalen Domänenwänden in der 5-ten Dimension spielen eine wichtige Rolle bei der Konstruktion chiraler invarianter Formulierungen der QCD oder sogar chiraler Eichtheorien. Durch einen algorithmischen Trick konnte sowohl die Simulation solcher 5-dimensionaler Systeme als auch die Effekte symmetrie-brechender Terme deutlich verbessert werden.

Rechnerentwicklung

Der enorme Rechenbedarf, der bei Simulationen dynamischer Quarks besteht, ist nur durch den Einsatz höchstleistungsfähiger Rechner zu erzielen. Die NIC Gruppe beteiligt sich an der Entwicklung, der Installation und dem Betrieb von speziell auf Anwendungen in der QCD ausgerichteten APE (Array Processor Experiment) Rechner. Neben Spezialrechnern hat die NIC-Gruppe Erfahrung mit handelsüblichen PC-Clustersystemen gewonnen.

Die NIC-Gruppe beteiligt sich intensiv an der Evaluierung verschiedener Rechnerarchitekturen auf ihre Eignung für Gitter-QCD Rechnungen. Es wurden Benchmark-Tests entworfen, die die wichtigsten Programmteile eines QCD-Codes enthalten und die schnell auf verschiedenen Architekturen getestet werden können. Die Ergebnisse wurden bereits auf internationalen Konferenzen vorgetragen. Es stellt sich heraus, dass für große Installationen im Multi-Teraflopereich Spezialrechner wie apeNEXT oder QCDOC am geeignets-

ten sind. Im Bereich der Größenordnung von 500 Gigaflop bis zu einem Teraflop stellen PC-Cluster eine Alternative dar.

Nationale und Internationale Zusammenarbeit

Die NIC Gruppe ist involviert in der ALPHA-Kollaboration, die europaweit vernetzt ist. Es gibt zudem enge Zusammenarbeit mit der Theorie-Gruppe in Rom II (Tor Vergata). Die QCDSF-Kollaboration unterhält enge Verbindungen mit der britischen UKQCD Kollaboration und mit der Lattice Hadron Physics Collaboration (LHPC) am Jefferson Lab. Sie arbeitet zudem eng mit der Universität in Regensburg zusammen. Die XLF-Kollaboration ist eine Kollaboration der FU Berlin, HU Berlin und DESY Zeuthen.

Die NIC Gruppe ist an zwei nationalen, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützten Projekten beteiligt. Das erste Projekt ist ein Sonderforschungsbereich/Transregio SFB/TR9-03 „Computergestützte theoretische Teilchenphysik“. Dieses Projekt vereinigt die Universitäten Karlsruhe, Aachen und HU Berlin, sowie die NIC und Theorie Gruppen von Zeuthen. Das allgemeine Ziel des SFB/TR ist, die Interpretation der zu erwartenden Hochpräzisionsdaten an zukünftigen Beschleunigern zu ermöglichen. Der SFB/TR ist in dieser Form weltweit einmalig, da er Störungstheorie, Phänomenologie und Gitterrechnungen zusammenbringt, um in einer transregionalen Zusammenarbeit grundlegende physikalische Fragen zu beantworten. (s. a. http://www.uni-karlsruhe.de/fs/Uni/mitarbeiter/pm_1022.html)

Das zweite Projekt ist die DFG Forschergruppe Gitter-Hadronen-Phänomenologie (<http://www-cgi.uni-regensburg.de/~sow10631/fogu/>). An dieser Forschergruppe beteiligen sich die Universitäten Regensburg, HU Berlin und Leipzig, sowie das MPI in München und das NIC/DESY Zeuthen. Das Physikprogramm beinhaltet Hadronphänomenologie, Gitterfeldtheorie, inklusive Algorithmenentwicklung, Gitterstörungstheorie und Renormierung, Operatorproduktentwicklung (OPE), Renormaloneffekte und Physik der Potenzkorrekturen, Heavy Quark Effective Theories' (HQET) und B-Physik, Physik des QCD Vakuums wie Instantonen, Monopole und Confinement. Für weitere Einzelheiten, siehe obige Web-Adresse.

INTAS Project 2000-111

„Hadron Physics and Vacuum Structure from Lattice QCD“ mit IHEP, ITEP, Dubna, Steklov Institute, ETH Zürich, HU Berlin, MPI München, Univ. Wuppertal. Dieses durch die Alexander-von-Humboldt-Stiftung, das Landau- und das Intas Programm geförderte Projekt dient der Zusammenarbeit und dem wissenschaftlichen Austausch mit Ländern aus Osteuropa (Polen, Russland und Bulgarien).

EU Network HPRN-CT-2000-00145 „Hadron Phenomenology from Lattice QCD“

(http://www.physics.gla.ac.uk/lattice_EU_network/) mit Univ. Glasgow, Univ. Bern, DESY Zeuthen, Univ. Edinburgh, Orsay, Univ. Rome I, Univ. Rome II, Univ. Southampton, Univ. Wuppertal. Es wird ein besonderes Augenmerk auf die Studentenausbildung gelegt. Regelmäßige Workshops dienen dem Austausch von wissenschaftlichen Ergebnissen und bieten Studenten in Form von einführenden Vorlesungen die Möglichkeit der Weiterbildung.

Euridice

European Investigations on Dafne and other International Collider Experiments using Effective Theories of Colors and Flavours from the Phi to the Upsilon (<http://www.lnf.infn.it/theory/rtn/>). In diesem europäischen Projekt werden theoretische Weiterentwicklungen von effektiven Feldtheorien, chirale Störungstheorie, QED, Entwicklungen in einer großen Anzahl von Farben sowie Gitterfeldtheorie vorangetrieben.

Ein neues Projekt im Rahmen des 6ten Rahmenprogramms der EU ist das I3HP, eine Infrastruktur für Hadronen und Kernphysik. Hier ist NIC mit der Gittertheorie zur Untersuchung der Spinstruktur der Hadronen vertreten.

LATFOR

Das Lattice Forum (LATFOR) der deutschen Gittergemeinschaft mit der Beteiligung von Gruppen in Österreich und der Schweiz hat seine Aktivitäten weitergeführt. Der momentane Koordinator des LATFOR ist der Leiter der NIC-Forschungsgruppe Elementarteilchenphysik. LATFOR hat sich als Aufgabe gestellt, die Gitter-Aktivitäten zu bündeln und zu koordinieren. Im Sommer 2003 entstand ein Proposal für LATFOR zur Anschaffung von 25 Teraflops (15 Teraflops bei DESY und 10 Teraflops bei der GSI).

Eine weitere Aktivität, an dem das NIC aktiv beteiligt ist, ist das ILDG (International Lattice Data Grid). Diese internationale Initiative strebt an ein Gridsystem aufzubauen, das es erlaubt, Rohdaten aus den Simulationen, die sogenannten Konfigurationen, einfach auszutauschen und zu verwerten. Das ILDG erlaubt so eine wesentlich effizientere Verwendung dieser teuren Rohdaten aus den Simulationen.

Arbeiten an Beschleunigertechnologien

Mit dem Photoinjektor-Teststand-Zeuthen (PITZ) betreibt DESY in Zeuthen einen eigenen kleinen Linearbeschleuniger. Er dient zur Entwicklung und Optimierung von lasergetriebenen Hochfrequenz-Photoelektronenquellen, wie sie bei zukünftigen Forschungsprojekten bei DESY, wie z. B. beim VUV-FEL und dem europäischen Röntgenlaser-Projekt XFEL zum Einsatz kommen. Darüber hinaus wurden spezielle Arbeiten für die Anlage VUV-FEL (Wire Scanner, Bypass) und für das Zukunftsprojekt TESLA in Zeuthen durchgeführt.

Photoinjektor-Teststand

Der Photoinjektor-Teststand ist ein Elektronenbeschleuniger, der in Zusammenarbeit mit anderen Kollaborationspartnern aufgebaut wurde und betrieben wird. Nachdem an PITZ im Jahre 2002 erstmalig Photoelektronen erzeugt wurden und die Anlage eine Inbetriebnahmephase durchlief, wurde diese Arbeit 2003 mit einer erfolgreichen Bilanz fortgesetzt. Die Anlage wurde weiter ausgebaut und wichtige Diagnose-Systeme erfolgreich in Betrieb genommen. Das Lasersystem wurde bezüglich einer Reihe von Parametern verbessert. Dies schlägt sich auch in wesentlich verbesserten Messergebnissen nieder. Die Messergebnisse wurden während regelmäßig stattfindender Messperioden im Schichtbetrieb gewonnen. Der Hohlraumresonator, kurz Gun genannt, wurde im Jahr 2003 praktisch vollständig durch Messungen charakterisiert und am 21. November für den Einsatz am VUV-FEL nach Hamburg geliefert. Die aktuellen Messergebnisse wurden auf mehreren internationalen Konferenzen vorgestellt.

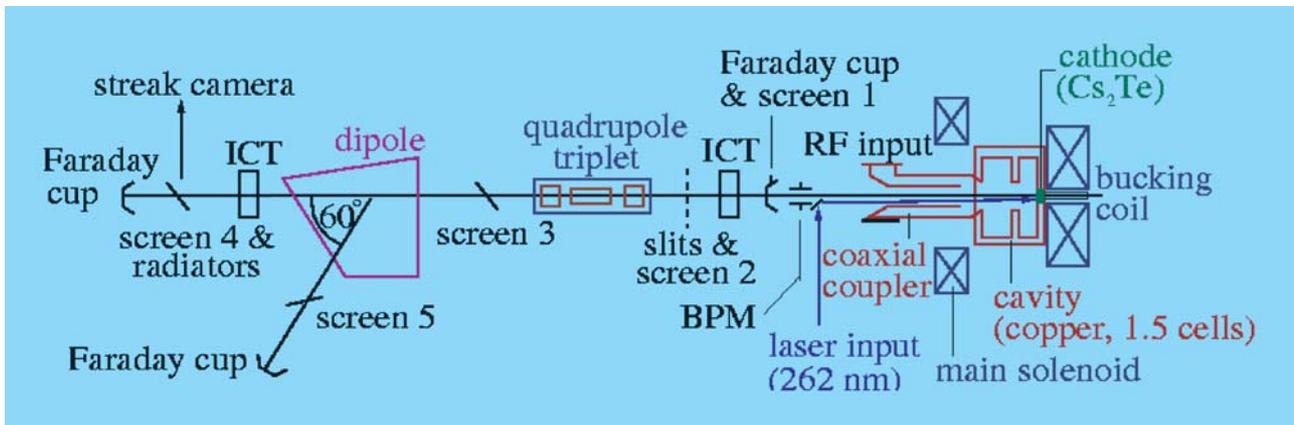


Abbildung 86: Schema des Photoinjektors.

Ausbau der Anlage

Als zwei wichtige, konkrete Verbesserungen und Erweiterungen von PITZ seien hier der Ausbau des Lasersystems und die Inbetriebnahme des Elektronenpaketlänge-Messsystems genannt. Im Lasersystem (siehe Abb. 87) wurde ein Pulsformer eingebaut, der das zeitliche Profil des Einzelimpulses vom Gauss-Profil zu einem Profil mit einem flachen langen Maximum (flat-top) umformt. In Simulationen wurde vorhergesagt, dass dies einen wesentlichen verbessernden Einfluss auf die transversale Emittanz haben soll. Dies konnte in den Messungen dieses Jahres verifiziert werden. Darüber hinaus wurden am Lasersystem eine Reihe von Einzelmaßnahmen durchgeführt, die entweder direkt eine Verbesserung der Strahlqualität bewirken (z. B. Steuerung der Konversionskristalle), oder ein stabileres Verhalten des Lasers (z. B. Regelung der Oszillatorlänge) sowie eine verbesserte Bedienbarkeit (Fernbedienung) ermöglichen. Ein weiterer wichtiger Schritt für die vollständige Charakterisierung der Elektronenquelle ist die Inbetriebnahme des Systems zur Messung der Elektronenpaketlänge. Dazu gehört eine Schirmstation, die verschiedene Radiatoren enthält, mit deren Hilfe das longitudinale Profil des Elektronenstrahls in ein entsprechendes Lichtpaket umgewandelt wird. Dieses wird dann mit Hilfe einer Streak-Kamera analysiert.

Messungen

Zu Beginn des Jahres wurde das Konditionieren der Gun fortgesetzt mit dem Ziel, höhere Gradienten und län-

gere Pulszüge zu erreichen und damit die mittlere HF-Leistung in der Gun zu maximieren. Erreicht wurden folgende Parameter:

- Pulszuglänge 0.9 ms,
- Wiederholrate 10 Hz,
- Gradient ~ 40 MV/m,
- Maximale mittlere HF-Leistung ~ 27 kW,
- Tastverhältnis 0.9%.

Mit diesen Ergebnissen wurden die Anforderungen, die für den Betrieb des VUV-FEL hinsichtlich der HF-Leistung gestellt wurden, vollständig erfüllt.

Die wichtigsten Messungen der Elektronenstrahldynamik betreffen die transversale Emittanz, da diese Größe ausschlaggebend für wesentliche Leistungsparameter eines nachfolgenden Freien-Elektronen-Lasers (FEL) ist. Die Messergebnisse für ein longitudinales Laserpuls-Profil mit Gauss-Form bzw. mit einem flat-top Profil werden gegenübergestellt:

- Für ein Gauss-förmiges zeitliches Laserprofil mit einer Länge von 7 ps FWHM und nur 0.5 nC Ladung wurde eine normierte Emittanz von (4.3 ± 0.5) mm · mrad in x-Richtung und von (3.7 ± 0.7) mm · mrad in y-Richtung gemessen.
- Für ähnliche experimentelle Parameter bei einem flat-top Laserprofil und 1.0 nC Pulsladung wurde eine normierte Emittanz in x-Richtung von (1.9 ± 0.2) mm · mrad und in y-Richtung von (1.5 ± 0.1) mm · mrad gemessen.

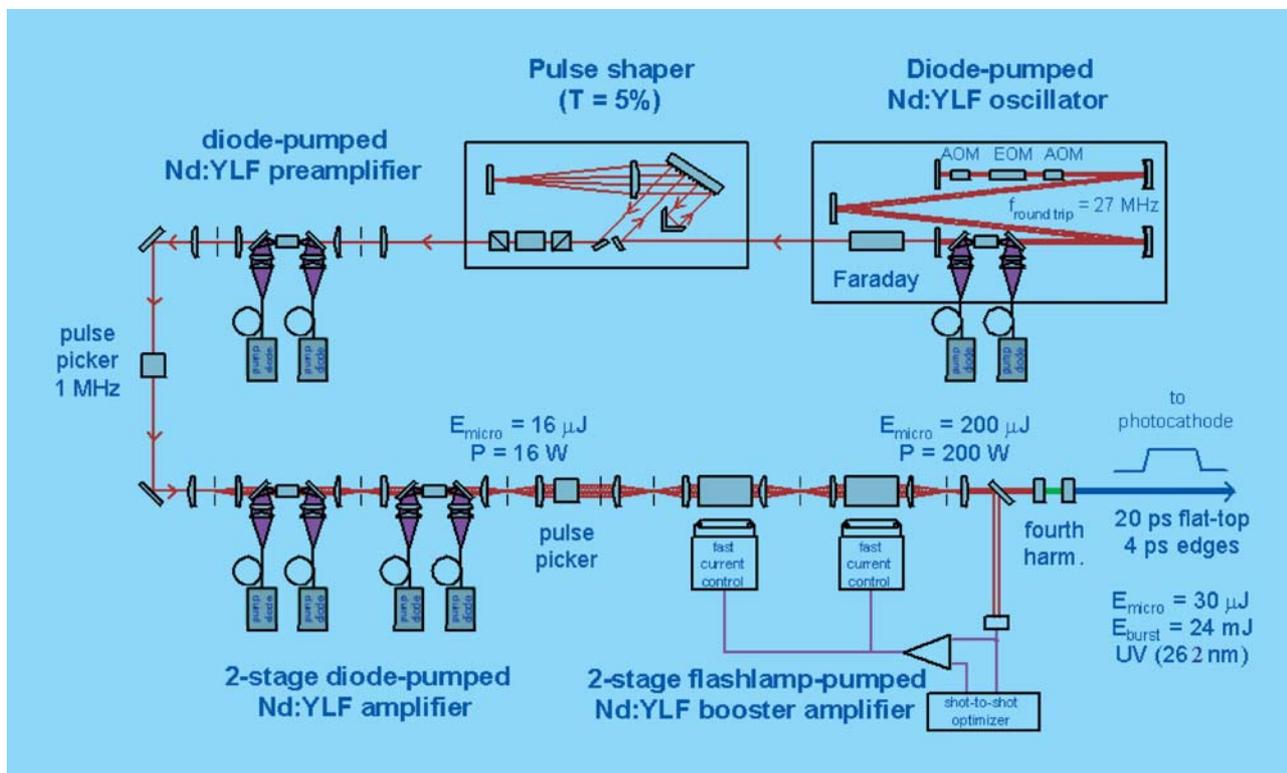


Abbildung 87: Schema des Lasers mit Pulsformer zur Erzeugung von flat-top Pulsen (I. Will, MBI).

Der Einfluss des longitudinalen Laserprofils ist offensichtlich. Mit diesen Werten wurden auch die Vorgaben für den Anfangsbetrieb von des VUV-FEL erreicht. Im Juni wurde das System für Messungen der Elektronenpaketlänge erfolgreich in Betrieb genommen. Dies ermöglichte nunmehr die weitere Charakterisierung des longitudinalen Phasenraums:

- Pulslänge: kürzeste Elektronenpaketlänge mit Silica-Aerogel Radiator bei 1 nC Ladung 6.31 ± 0.14 (stat.) ± 1.24 (syst.) mm,
- Kleinste Impulsbreite bei der gleichen Einstellung: (33 ± 7) keV/c.

An den Kathoden wurden umfassende Untersuchungen zu Dunkelstrom und Quantenausbeute durchgeführt. Das Ziel ist die Weiterentwicklung von Kathoden mit hoher und stabiler Quantenausbeute und niedrigem Dunkelstrom.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Elektronenquelle mit sehr guten Eigenschaften bereitgestellt werden konnte, die die Anfangsanforderungen des VUV-FELs erfüllt.

Vorbereitungen für PITZ 2

Im Jahr 2003 wurden die Vorbereitungen für die wesentliche Erweiterung von PITZ konzentriert fortgeführt. Wesentliches Merkmal der Projektstufe PITZ2 ist der Einbau einer weiteren Beschleunigerkavität, womit eine Elektronenenergie von etwa 30 MeV erreicht wird. Darüber hinaus wird diese Anlage ein wesentlich erweitertes Strahldiagnosesystem enthalten. Hervorzuheben ist hierbei die Präparation der ersten zum Einsatz kommenden Beschleuniger-Kavität (Booster), einer neunzelligen normalleitenden Kupferkavität, sowie die spezielle Entwicklung einer Beschleunigerkavität in Kooperation zwischen DESY und dem INR Troitsk.

Das zweite HF-System wurde kontinuierlich aufgebaut, es wird 2004 vollendet werden. Seit Herbst beteiligen sich weitere Partner aus Instituten aus Frankreich und Italien an dem PITZ Projekt.

Wire-Scanner für VUV-FEL

Wire Scanner werden seit vielen Jahren in Beschleunigern für die Bestimmung der Ortskoordinaten und des Profils von Teilchenstrahlen eingesetzt. Als Beitrag zur Strahldiagnostik zum VUV-FEL wurden 7 Stationen vor, zwischen und hinter den 6 Undulatoren mit jeweils 2 senkrecht zur Strahlachse (x und y Richtung) orientierten Wire-Scannern aufgebaut. Die Abbildung 88 zeigt die erste eingebaute Station vor der Undulatorsektion.

Die besonderen Merkmale der Wire-Scanner sind die konstante Scangeschwindigkeit von 1 m/sec in Kombi-

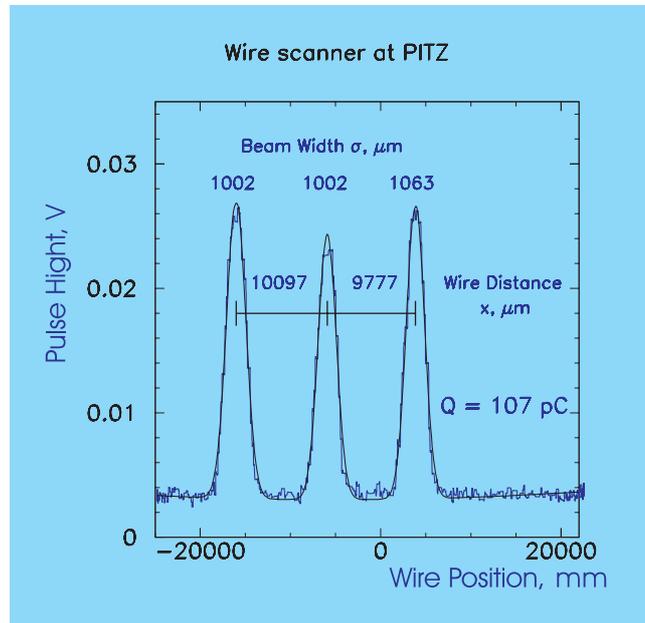


Abbildung 89: Messergebnis des Einsatzes eines Wire-Scanners bei PITZ.



Abbildung 88: Eingebaute Station vor der Undulatorsektion.

nation mit einer hohen Positioniergenauigkeit von einigen μm über eine Distanz von 30 mm. Jeder Scanner besitzt eine Keramikgabel, die mit maximal 3 Drähten bestückt werden kann. Der Elektronenstrahl trifft den Draht im linearen Arbeitsbereich, die am Draht gestreuten Elektronen werden außerhalb des Strahlrohres detektiert. Die Korrelation zwischen Drahtposition und dem Signal der am Draht gestreuten Elektronen erlaubt eine absolute Strahlortsbestimmung von besser als $100 \mu\text{m}$. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten technischen Parameter eines Wire-Scanners gegeben:

Hubweg gesamt	$S = 48 \text{ mm}$
Hubweginkrement	$\Delta S = 0.0028 \text{ mm}$
Geschwindigkeitsbereich	$v = 0.1 \text{ bis } 1000 \text{ mm/s}$
max. Beschleunigung	$a = 65.4 \text{ m/s}^2$
Schrittfrequenzbereich des Motors	$f_{\text{mot}} = 40\text{--}1400 \text{ Hz}$
Schrittinkel des Motors	$\varphi = 1.8^\circ$
Mikroschritt des Motors	$\Delta\varphi = 1.8^\circ/256 = 0.0070312^\circ$
Messdrähte Durchmesser	$d = 10 \text{ bis } 80 \mu\text{m}$
Gabel - Material	Macor - Keramik
Signalleitungsausführung	$n = 4$
Messtaster:	
Messbereich	$s = 60 \text{ mm}$
Auflösung	$\Delta s = 0.001 \text{ mm}$

Ein Prototyp des Wire-Scanners wurde in den Photo Injektor-Teststand in Zeuthen (PITZ) eingebaut. Zur Bestimmung der Position und des Profils des Elektronenstrahls wurde die Keramikgabel mit $30\ \mu\text{m}$ dicken Wolframdrähten bestückt. Ein Ergebnis ist in Abbildung 89 zu sehen.

Der Wire-Scanner wurde mit $1\ \text{mm}/\text{sec}$ im sogenannten Slow Scan Mode betrieben. Abbildung 89 zeigt das Detektorsignal der gestreuten Elektronen in Abhängigkeit von der Position der Gabel bei einer Strahlladung von ca. $100\ \text{pC}$. Nimmt man eine Gau-Verteilung des Strahlprofils an, dann hat der Strahl eine Breite von $\sigma \cong 1000\ \mu\text{m}$. Der Mittenabstand zwischen den Drähten beträgt $10\ \text{mm}$.

TESLA-Diagnose

Strahllagemonitore

Die Arbeiten der TESLA Gruppe ‚Diagnose‘ konzentrierten sich im Berichtszeitraum auf die Entwicklung und Tests von Strahllagemonitoren für den e^+e^- -Linear Collider TESLA. Diese Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit der TU Berlin durchgeführt und zusammen mit den Arbeiten für TTF im Jahre 2003 abgeschlossen.

Cavity-Monitore für den Superkryo-Modul wurden neu konzipiert, gebaut und im Labor getestet. Dieser neue Monitor besitzt für Einzelpaketmessungen eine

Ortsauflösung besser als $10\ \mu\text{m}$ und reduziert Wärmeeinträge im Monitor auf ein akzeptables Maß. Die Elektronik für diesen Monitor wurde weiterentwickelt und wird unter Strahlbedingungen in Rossendorf getestet.

Die Studien für einen speziellen Strahllagemonitor mit extrem hoher Positionsgenauigkeit im Einzelpaketbetrieb für TESLA wurden fortgeführt. Die jetzige $5.5\ \text{GHz}$ Variante erlaubt den Ort eines Teilchenpaketes mit $100\ \text{nm}$ in einem Linearitätsbereich von $\pm 1.5\ \text{mm}$ zu bestimmen. Hervorragend ist auch sein Zeitverhalten: die Lebensdauer des Signals im Monitor beträgt $14\ \text{nsec}$, so dass auch bei $400\ \text{GeV}$ Strahlenergiebetrieb jedes Paket einzeln vermessen werden kann.

Energiespektrometer

Zeuthener Physiker haben gemeinsam mit dem VIK Dubna, Dzhelepov Laboratorium für Kernprobleme eine Initiative gestartet, um ein für den Linearcollider TESLA notwendiges Gerät zur Vermessung der Strahlenergie mit einer Genauigkeit besser als 10^{-4} zu entwickeln. Ausgehend von den Forderungen des Physikprogramms müssen Probleme zu Magneten, zu hochauflösenden Monitoren, zur Präzisionsausrichtung und Stabilisierung sowie der Monitorierung aller Komponenten des Spektrometers geklärt werden. Gleichzeitig werden komplementäre Möglichkeiten („radiative return“ Ereignisse, Nutzung der Synchrotronstrahlung) zur Strahlenergiemessung untersucht. Ziel ist es, einen Technischen Design Report im Juni 2004 vorzulegen.