

Forschung Teilchenphysik

Inhalt

H1-Experiment	57
ZEUS-Experiment	69
HERMES-Experiment	83
HERA-B-Experiment	95
ATLAS-Experiment	99
CMS-Experiment	105
Astroteilchenphysik	109
Theoretische Physik	115
Aktivitten in Hamburg	115
Aktivitäten in Zeuthen	127
Aktivitäten am NIC	131
International Linear Collider	135
Forschung Linearbeschleuniger-Technologien	153

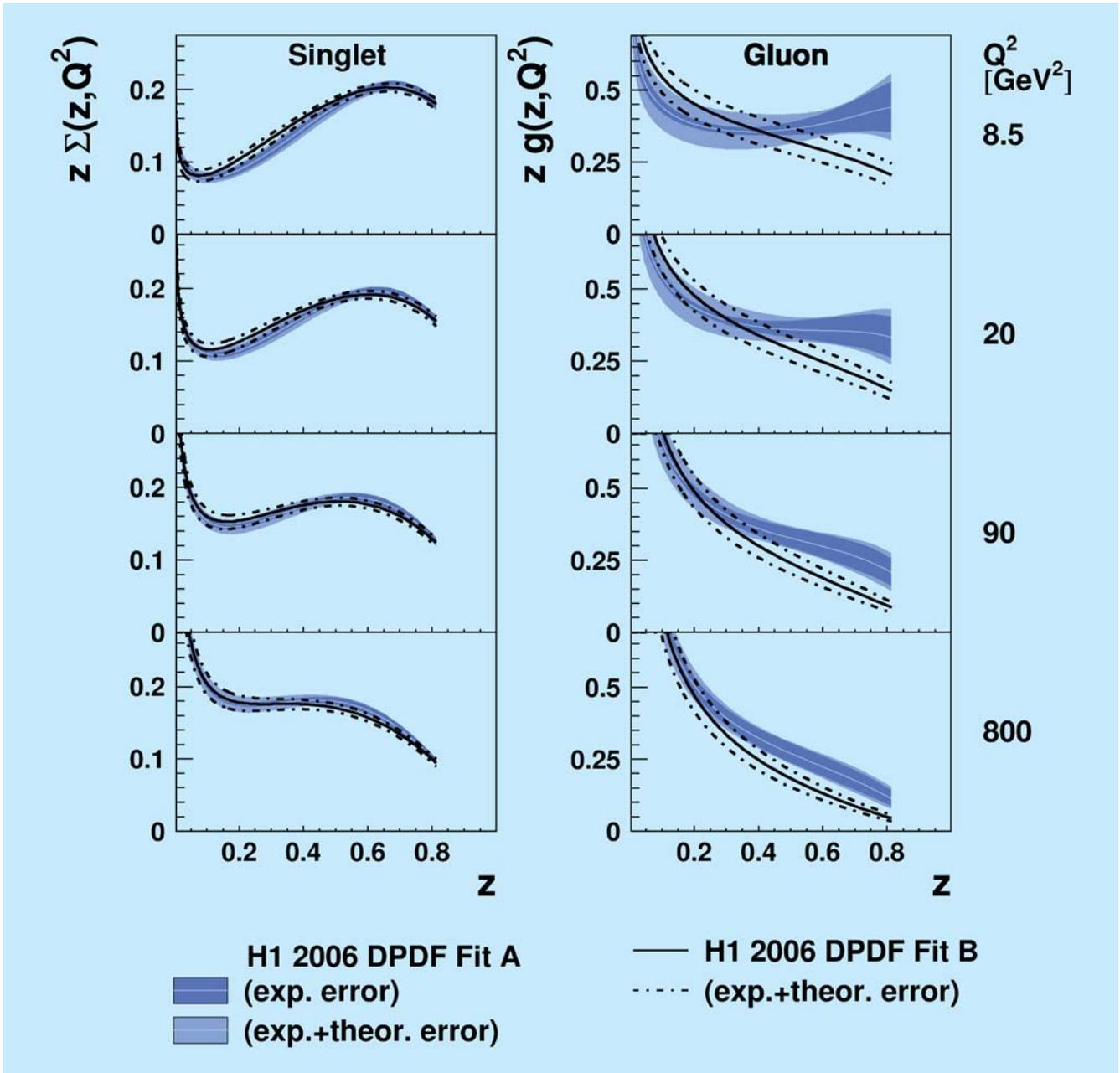


Abbildung 15: Diffraktive Quarksinglet- und Gluon-Dichteverteilungen als Funktion des Partonimpulsanteils, z , für verschiedene Werte von Q^2 , wie sie sich aus zwei unterschiedlichen NLO QCD Fits an die Messergebnisse des diffraktiven Wirkungsquerschnitts ergeben. Die beiden Fits A und B unterscheiden sich in der gewählten Form der Parametrisierung der diffraktiven Parton-Dichteverteilungen, siehe Text auf Seite 63.

H1-Experiment

Beteiligte Institute: RWTH Aachen, Univ. Antwerpen, Vinca Inst. of Nucl. Sci. Belgrad, Univ. of Birmingham, Inter-Univ. ULB-VUB Brussels, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Inst. for Nucl. Phys. Cracow, Univ. Dortmund, JINR Dubna, CEA Saclay, DESY und Univ. Hamburg, Univ. und MPI Kernphys. Heidelberg, Slovak Acad. Sci. Košice, Univ. of Lancaster, Univ. of Liverpool, QMWC London, Univ. of Lund, Univ. of Manchester, Univ. Marseille, CINVESTAV Merida und Mexico, ITEP und Lebedev Inst. Moscow, MPI Phys. München, Univ. de Paris-Sud Orsay, Ec. Polytech. Palaiseau, Univ. Paris VI und VII, Univ. of Montenegro Podgorica, Czech Acad. Sci. und Charles Univ. Prag, INFN und Univ. 3 Rom, Inst. for Nucl. Research and Nucl. Energy Sofia, Inst. of Phys. and Techn. Mongolian Acad. of Sci. Ulaanbaatar, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ. Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: M. Klein, DESY (bis August 2006); C. Vallée, CPPM Marseille, Frankreich (ab August 2006)

HERA und die H1 Kollaboration konnten im Jahr 2006 wieder einen neuen Rekord in der Luminosität erzielen. Insgesamt wurden für Physikanalysen Daten aufgezeichnet, die einer integrierten Luminosität von 150 pb^{-1} entsprechen. Dies ist eine Steigerung gegenüber dem bislang erfolgreichsten Jahr 2005 um 25%. In der ersten Jahreshälfte wurde der im Herbst 2004 begonnene HERA-Betrieb mit Elektronen fortgesetzt, sodass nun mit insgesamt etwa 180 pb^{-1} eine mehr als zehnmal größere e^-p -Statistik für Physikanalysen zur Verfügung steht als bei HERA I. Im Juli wurde HERA nach einer kurzen Unterbrechung wieder auf den Betrieb mit Positronen umgestellt. Der Wiederanlauf erfolgte problemlos, sodass H1 in der zweiten Jahreshälfte $90 \text{ pb}^{-1} e^+p$ -Daten aufzeichnen konnte.

Die Effizienz der H1-Datennahme konnte im Laufe des Jahres kontinuierlich verbessert werden und erreichte in den letzten Monaten regelmässig Werte um 85%. Alle Detektorkomponenten, einschließlich der drei Ende 2005 wieder eingebauten Siliziumdetektoren (FST, BST und CST) liefen sehr zuverlässig und der schon im Jahr 2005 zu großen Teilen installierte Jet-Trigger wurde erfolgreich in Betrieb genommen.

Die durch Verwendung der dritten Triggerstufe des Fast Track Triggers (FTT L3) gewonnene Flexibilität konnte dazu genutzt werden, die für die Datennahme verwendete Triggerzusammensetzung weiter zu optimieren.

Parallel zur Datennahme wurde das Verständnis der Detektorsystematik und der Kalibration weiter verbessert. Zudem wurden Maßnahmen getroffen, die es erlauben, den Zeitaufwand für eventuelle Wiederholungen der gesamten Datenrekonstruktion auf ein Viertel zu reduzieren. Für die Rechenzeit-intensive Massenproduktion von Monte Carlo Ereignissen werden von H1 inzwischen überwiegend CPU Ressourcen des GRID genutzt. Hier kann H1 auf 5 Computerzentren zurückgreifen, die im Rahmen des GRID zur Verfügung stehen. Die nach Abschluss der Datennahme veränderten Anforderungen im Bereich der Datenverarbeitung wurden in einer Neuauflage des im Jahre 2000 erstellten Dokuments zur H1 Computing Strategie zusammengefasst.

Von den insgesamt 11 im Berichtsjahr veröffentlichten H1-Publikationen sind insbesondere zwei Analysen im Bereich der Diffraktion hervorzuheben, die eine erheblich verbesserte Messung der diffraktiven Partondichten

erlaubten. Die anderen Papiere behandeln weitere Themen im Bereich der Quantenchromodynamik (QCD), zur Photonstruktur und der Produktion von schweren Quarks, sowie Suchen nach Physik jenseits des Standardmodells. Darüberhinaus wurden H1 Resultate in mehr als 120 Vorträgen von Mitgliedern der Kollaboration auf zahlreichen Konferenzen und Workshops vorgestellt. Zu der in diesem Jahr in Moskau stattgefundenen Sommerkonferenz (ICHEP06) wurden von der H1 Kollaboration neben vielen weiteren Beiträgen 29 völlig neue Analysen eingereicht. Erwähnenswert ist, dass zum erstenmal auch ein Beitrag gemeinsam von H1 und ZEUS verfasst wurde, in dem die Resultate beider Kollaborationen zur Interferenz der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung bei hohen Impulsüberträgen kombiniert wurden, um eine möglichst genaue Bestimmung der durch die Valenzquarks dominierte Strukturfunktion xF_3 zu ermöglichen. Zudem ermöglichte die Kombination der Daten die erste Beobachtung der Paritätsverletzung für den Neutralen Strom für Distanzen bis hinab zu 10^{-18} m. Verstärkte Zusammenarbeit mit der ZEUS Kollaboration findet auch auf anderen Gebieten der HERA Physik statt. Mittlerweile wurden fünf H1-ZEUS übergreifende Arbeitsgruppen gebildet, deren Aufgabe es ist, die Kombination der gesamten HERA Daten optimal vorzubereiten. Zudem wurde innerhalb von H1 eine neue Arbeitsgruppe eingesetzt, die alle Analysen zur Extraktion von Partondichten und anderen Physikparametern aus den Daten auf eine gemeinsame Basis stellen soll.

Bereits im Herbst 2005 hat H1 sein Interesse bekundet, einen Teil der in 2007 verbleibenden Betriebszeit für Messungen bei reduzierter Protonenergie zu verwenden, um die longitudinale Strukturfunktion des Protons, F_L , modellunabhängig zu bestimmen. In den vergangenen Monaten wurden die vorbereitenden Studien für solch eine Messung sowohl von HERA als auch von H1 erfolgreich fortgesetzt.

Das Forschungsprogramm von H1, das auch nach Ende der aktiven Datennahme auf mehrere Jahre angelegt ist, zieht weiterhin neue Gruppen an. Im Berichtsjahr sind zwei weitere Institute von der H1 Kollaboration als neue Mitglieder aufgenommen worden.

Der H1-Detektor

Datennahme

Nach der Wartungsperiode zum Jahreswechsel begann das H1-Experiment im Februar 2006 mit seiner bisher längsten Datennahmeperiode. Mit Ausnahme der kurzen Unterbrechung beim Wechsel von Elektron- auf Positron-Betrieb Mitte des Jahres, wurde der Detektor kontinuierlich betrieben, und es ist geplant ohne weitere Wartungsperioden bis Mitte 2007 Daten aufzuzeichnen.

Das Jahr 2006 war das erfolgreichste Jahr für HERA und H1, nicht nur in Hinsicht auf die aufgezeichnete Datenmenge sondern auch bezüglich der Datenqualität. Von den von HERA produzierten 200 pb^{-1} kann H1 insgesamt 150 pb^{-1} für Physikanalysen verwenden. Dies bedeutet eine Steigerung der Datenmenge um 25% im Vergleich zum bisher besten Jahr 2005.

In der ersten Hälfte des Jahres wurde die Aufzeichnung von e^-p Kollisionen fortgesetzt und H1 akkumulierte in diesem Betriebsmodus fast 60 pb^{-1} . Damit steht H1 für die Physikanalyse eine e^-p Datenmenge von insgesamt 180 pb^{-1} zur Verfügung. Nach der Umstellung von HERA auf Positron-Betrieb konnte H1 ab Juli bis Ende 2006 etwa 90 pb^{-1} an e^+p Kollisionen aufzeichnen.

Dank der verbesserten HERA Betriebsbedingungen und einer Reihe von Verbesserungen im Bereich der H1 Trigger- und Auslesesysteme sowie der Steuerung der Hochspannungsversorgung konnte die Gesamteffizienz der Datennahme in den letzten Monaten auf etwa 85% gesteigert werden.

Die Richtung der longitudinalen Leptonpolarisation wurde in dieser Datenperiode sowohl für den e^-p als auch für den e^+p Betrieb jeweils einmal gewechselt, um in beiden Datensätzen möglichst ausgeglichene Datenmengen für beide Ausrichtungen zu erhalten.

Reparaturen und Erweiterungen

Der Wiedereinbau der reparierten, bzw. neu aufgebauten Siliziumdetektoren (FST, CST, BST) in der War-

tungsperiode 2005/2006 erforderte ein kurzes Öffnen des Strahlvakuum in der H1 Region. Durch frühzeitiges Abpumpen war das Vakuum bereits bei Beginn der Datennahme im Februar 2006 gut genug, um einen effizienten Betrieb von H1 zu ermöglichen, und hatte schon Ende März seinen Sollwert wieder erreicht.

Um die Stabilität der Datennahme weiter zu erhöhen, wurde für die Auslese der Siliziumdetektoren der optische Ring durch ein schon in der zentralen Datennahme von H1 bewährtes, auf Ethernet basierendes Datennahmesystem ersetzt.

Weitere Wartungsarbeiten betrafen die innere zentrale Proportionalkammer (CIP) und das rückwärtige Kalorimeter (Spacal), was ebenfalls zu einer Verbesserung der Datennahmeeffizienz und der Datenqualität führte.

Ein im Juni 2006, unmittelbar vor dem Wechsel auf den Positronbetrieb, durch Synchrotronstrahlung verursachtes Vakuumleck erforderte die Rücknahme einer im Jahr 2002 vorgenommenen Modifikation des Strahlrohres im Abstand von 6 Metern von H1. In der neuen Konfiguration kann nicht mehr ausgeschlossen werden, dass Abweichungen des Positronorbits vom Sollwert zur Rückstreuung eines erheblichen Teils der direkten Synchrotronstrahlung in das Experiment führen. Um eine mögliche Schädigung von Detektorkomponenten zu vermeiden, musste daher ein automatischer Strahldump implementiert werden. Dies konnte innerhalb kurzer Zeit durch die Verwendung der Signale von zwei unabhängigen Strahlungsmonitoren von H1 realisiert werden.

Im Laufe des Jahres wurden die neuen Elemente des H1 Triggersystems in den Routinebetrieb eingebunden. Die letzte Stufe des Fast Track Triggers (FTT L3) wurde einerseits dazu eingesetzt, die Selektivität vorhandener Trigger zu steigern, und erlaubte andererseits, qualitativ neuartige Trigger zu etablieren. Darüber hinaus wurde der bereits im letzten Jahr installierte Jet-Trigger zur weiteren Optimierung der Triggerzusammensetzung verwendet. Im Hinblick auf die geplante Datennahme bei einer reduzierten Protonenergie von 460 GeV für die Messung der longitudinalen Strukturfunktion F_L wurde ein auf den Signalen von CIP, BST und Spacal basierender neuer Trigger gebaut, installiert und in Betrieb

genommen. Dieser Spacal-Topologische-Trigger (STT) verwendet programmierbare Triggerlogik, um topologische Signaturen in den drei Detektoren zu erkennen und auf diese Weise Untergrund zu verwerfen, was zu einer besseren Ausnutzung der für die Datenübertragung vorhandenen Bandbreite führt.

Physikergebnisse

Quantenchromodynamik

Eine der Veröffentlichungen beinhaltet die Analyse von Zweijet-Ereignissen in der Photoproduktion. In Photoproduktionsprozessen kann das Photon nicht nur als punktförmiges Objekt (*direktes Photon*) an der harten Wechselwirkung teilnehmen, sondern fluktuiert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorher in einen hadronischen Zwischenzustand (*aufgelöstes Photon*). Jets mit hohem Transversalimpuls können sowohl durch eine direkte Wechselwirkung eines Partons aus dem Proton mit dem nahezu reellen Photon, als auch mit einem Parton aus dem aufgelösten Photon erzeugt werden. Die Partonen können hier sowohl Quarks als auch Gluonen sein. Der Wirkungsquerschnitt für die Zweijet-Produktion kann in perturbativer QCD berechnet werden und seine Messung liefert die Möglichkeit, die Partondichten (PDF's) von Proton und Photon zu bestimmen.

Es wurden Daten der Jahre 1999 und 2000 entsprechend einer Luminosität von 67 pb^{-1} untersucht. In der Analyse wurden mindestens zwei Jets mit wenigstens 25 (15) GeV transversaler Energie verlangt. Aus der Kinematik der Jets können die relativen Impulsbruchteile x_γ und x_p der an dem harten Streuprozess beteiligten Partonen des Photons bzw. Protons bestimmt werden. Wirkungsquerschnitte wurden als Funktion dieser Variablen gemessen und mit den Vorhersagen von zwei unterschiedlichen QCD-Modellen verglichen. Im ersten Modell wird der harte Streuprozess in niedriger Ordnung berechnet und Effekte höherer Ordnung durch Partonschauer simuliert. Im Gegensatz hierzu wird in dem zweiten Modell das Matrixelement in nächstführender Ordnung berechnet. In Abbildung 16

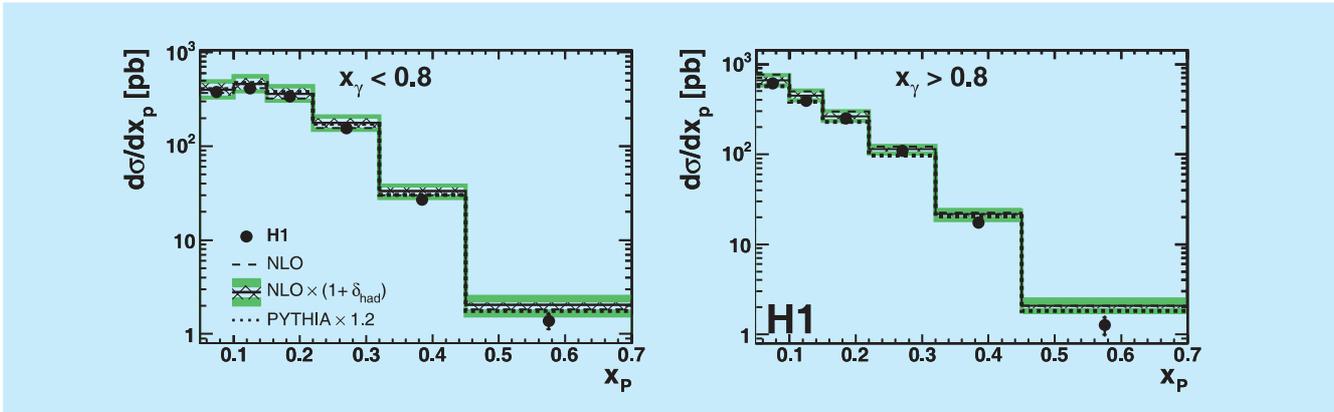


Abbildung 16: Wirkungsquerschnitt für Zweijet-Photoproduktion als Funktion von x_p für zwei Bereiche von x_γ verglichen mit den Vorhersagen zweier QCD-Rechnungen.

wird der Wirkungsquerschnitt als Funktion von x_p für zwei Bereiche von x_γ gezeigt und mit der Erwartung verglichen. Sowohl im Bereich direkter Photonwechselwirkung ($x_\gamma > 0.8$) als auch im Fall aufgelöster Photonstruktur ($x_\gamma < 0.8$) beschreiben beide QCD Rechnungen die Daten gut. Die gute Beschreibung auch anderer, hier nicht gezeigter kinematischer Variablen ist in Übereinstimmung mit unseren Vorstellungen von der Partonstruktur des Protons und der des ausgetauschten Photons und bestätigt unser Verständnis des harten Streuprozesses.

Physik schwerer Quarks

Dem Nachweis schwerer Quarks bei HERA (Charm und Beauty) kommt besondere Bedeutung zu, da bei der Berechnung der Wirkungsquerschnitte schon allein durch die große Quarkmasse eine harte Skala vorhanden ist. Daher sind Rechnungen der perturbativen QCD anwendbar, die experimentell überprüft werden können. Auch in diesem Jahr beschäftigen sich mehrere Veröffentlichungen mit diesem zentralen Thema der HERA Physik. In vorherigen Analysen, über die in den vergangenen Jahren schon berichtet wurde, konnte bereits demonstriert werden, dass bei HERA der dominante Prozess zur Erzeugung schwerer Quarks die Photon-Gluon Fusion ist. Unter Verwendung der HERA I Daten von ca. 50 pb^{-1} konnten nun weitere detailliertere Untersuchungen angestellt werden. In

zwei der Analysen wird die Rekonstruktion von D^* -Mesonen über den Zerfallskanal $D^* \rightarrow D^0 \pi \rightarrow K \pi \pi$ verwendet, um Charm-Ereignisse zu selektieren. Dank der um einen Faktor fünf gegenüber früheren Analysen verbesserten Statistik sind bei der ersten der beiden Veröffentlichungen über Ereignisse der Photoproduktion die experimentellen Fehler für inklusive D^* -Wirkungsquerschnitte erheblich kleiner als die Fehler der NLO Rechnung. In den differentiellen Verteilungen werden zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen Daten und Vorhersagen beobachtet. Die größere Statistik erlaubt es, Ereignisse zu studieren, die neben dem D^* mindestens einen Jet enthalten. Diese zusätzliche Bedingung erhöht die Sensitivität gegenüber höheren Ordnungen der QCD und bietet die Möglichkeit, zwischen unterschiedlichen theoretischen Vorhersagen zu unterscheiden. Aus den unterschiedlichen Polarwinkelabhängigkeiten der D^* -Mesonen und der Jets lässt sich schliessen, dass diese Jets mit hoher Wahrscheinlichkeit von Gluonen oder leichten Quarks verursacht werden.

Zusätzliche Information erhält man aus der Winkelkorrelation in der transversalen Ebene. In niedrigerer Ordnung erwartet man, dass die beiden Quarks mit einer Winkeldifferenz $\Delta\phi = 180^\circ$ emittiert werden. Da das D^* -Meson und der Jet die ursprüngliche Richtung der Quarks in guter Näherung beibehalten, liefert der Verlauf der $\Delta\phi(D^*, \text{jet})$ -Verteilung wichtige Hinweise auf die Größe von Beiträgen höherer Ord-

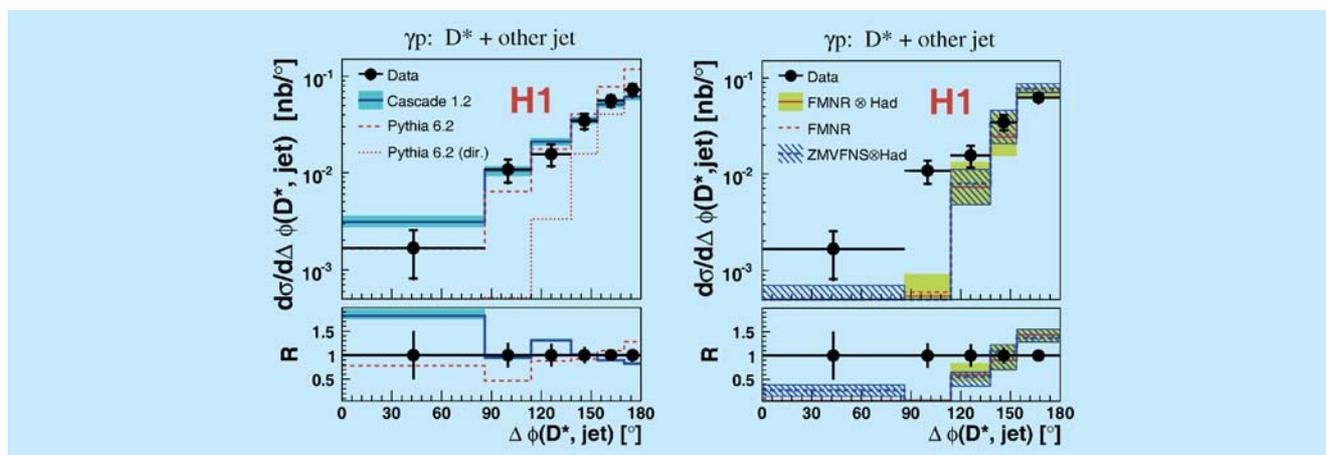


Abbildung 17: Vergleich des gemessenen $D^* + \text{jet}$ Photoproduktions-Wirkungsquerschnitts als Funktion von $\Delta\phi(D^*, \text{jet})$ mit den Vorhersagen von Monte Carlo Programmen (links) und mit NLO Rechnungen (rechts). Im unteren Teil der Figur ist jeweils das Verhältnis von gemessenem zu vorhergesagtem Wirkungsquerschnitt gezeigt.

Abbildung 17 zeigt den gemessenen Wirkungsquerschnitt als Funktion von $\Delta\phi(D^*, \text{jet})$ im Vergleich zu verschiedenen Monte Carlo Vorhersagen und zu Rechnungen in nächst führender Ordnung. Die Abweichungen der Vorhersage des Monte Carlo Programms CASCADE von den Daten zeigen, dass die in diesem Ansatz verwendete unintegrierte Gluondichte den Bereich großer Transversalimpulse k_t etwas überschätzt. Auf der anderen Seite unterschätzen die vorhandenen NLO-Rechnungen den Bereich $\Delta\phi(D^*, \text{jet}) < 120^\circ$ beträchtlich, was auf das Vorhandensein von zusätzlicher harter QCD-Strahlung hinweist. Für Ereignisse, die neben dem D^* zwei Jets enthalten, kann der Anteil des Photonimpulses x_γ^{obs} , der am harten Streuprozess teilnimmt, bestimmt werden. Es zeigt sich, dass in dem Bereich $x_\gamma^{\text{obs}} < 0.6$, in dem aufgelöste Photonen und andere Effekte höherer Ordnung eine Rolle spielen, alle Rechnungen zu kleine Wirkungsquerschnitte liefern.

Die andere erwähnte Veröffentlichung dehnt die Studien von Zweijet-Ereignissen, die ein D^* enthalten, zum ersten Mal auf den Bereich der tief-inelastischen Streuung, $2 \leq Q^2 \leq 100 \text{ GeV}^2$ aus. Der Vergleich der gemessenen Verteilung des azimuthalen Öffnungswinkels zwischen den beiden Jets mit den theoretischen Vorhersagen führt zu sehr ähnlichen Schlussfolgerungen wie im oben diskutierten Fall der Photoproduktion.

Hingegen wird in dieser Analyse die x_γ^{obs} -Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes im Rahmen der Fehler gut vorhergesagt, sodass es hier keine Notwendigkeit für zusätzliche aufgelöste Photon-Beiträge gibt, die über die schon in den NLO-Rechnungen vorhandenen hinausgehen.

Eine dritte Analyse nutzt eine schon mehrfach erfolgreich verwendete, auf der endlichen Lebensdauer der schweren Quarks basierende Technik zur Bestimmung von differentiellen Charm und Beauty Wirkungsquerschnitten für Ereignisse mit zwei Jets in der Photoproduktion. Mit der hohen Präzision des zentralen Siliziumdetektors von H1 (CST) lassen sich schwere Quarks enthaltende Teilchen daran erkennen, dass sie wegen der größeren Lebensdauer nicht schon am Erzeugungsort, dem $e p$ Wechselwirkungspunkt, sondern erst nach einer Strecke von einigen $100 \mu\text{m}$ zerfallen. Während die auf diese Weise bestimmten Charm-Wirkungsquerschnitte gut mit den NLO-Vorhersagen übereinstimmen, liegt der totale Beauty-Wirkungsquerschnitt etwa einen Faktor 2 über der Erwartung, wobei sich die Diskrepanz im Bereich $x_\gamma^{\text{obs}} < 0.85$, wo aufgelöste Photonen eine größere Rolle spielen, noch etwas verstärkt (siehe Abbildung 18 links). In der durch direkte Prozesse dominierten Region, $x_\gamma^{\text{obs}} > 0.85$, stimmen die relativen Beiträge von

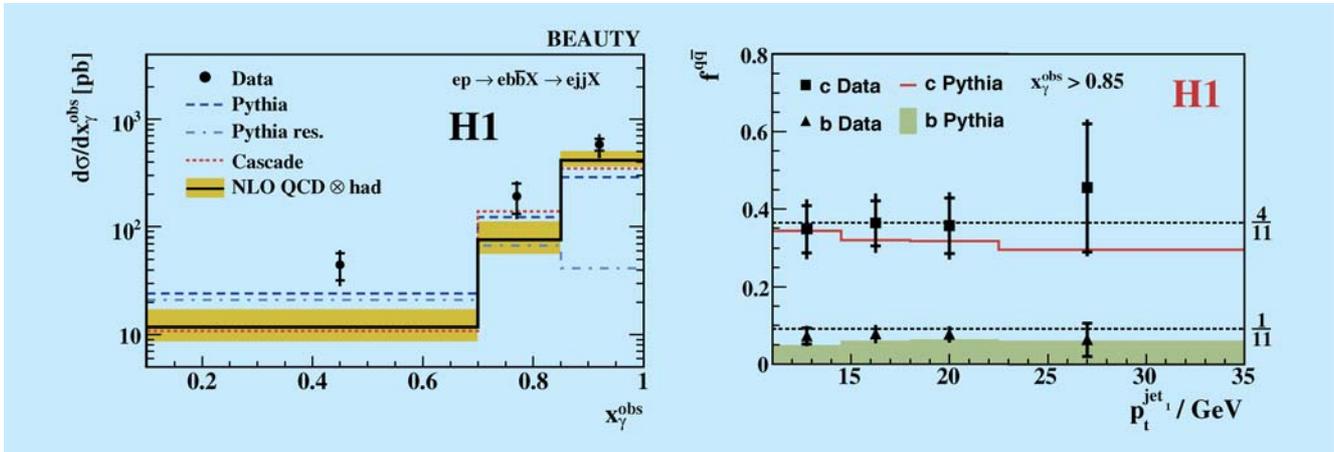


Abbildung 18: Vergleich des gemessenen Photoproduktions-Wirkungsquerschnitts für Zweijet-Ereignisse mit Beauty als Funktion von x_γ^{obs} mit den Vorhersagen von Monte Carlo Programmen und NLO Rechnungen (links). Relativer Anteil von schweren Quarks als Funktion des Jet-Transversalimpulses im Bereich $x_\gamma^{\text{obs}} > 0.85$ (rechts).

Charm und Beauty Ereignissen sehr gut mit der naiven Erwartung für den direkten Photon-Gluon Fusionsprozess überein. Dies ist im rechten Teil der Abbildung 18 zu sehen, wo das Verhältnis für Charm und Beauty als Funktion des Jet-Transversalimpulses dargestellt ist und mit der naiven, sich aus den Quarkladungen ergebenden Erwartung und der Monte Carlo Vorhersage verglichen wird.

Diffraktion

Schon in den frühen HERA Daten wurde eine spezielle Klasse von Ereignissen beobachtet, welche in der Richtung des auslaufenden Protons eine Lücke im Teilchenfluss (*rapidity gap*) zwischen den auslaufenden Protonfragmenten und dem hadronischen Endzustand aufweisen. Solche Ereignisse können dadurch erklärt werden, dass ein farb-neutrales Objekt zwischen dem bei der Elektronstreuung emittierten Photon und dem Proton ausgetauscht und dabei ein hadronisches System erzeugt wird. Die detaillierte Untersuchung dieser Ereignisse gibt Aufschluss über die Struktur des ausgetauschten farb-neutralen Objektes, welches als Pomeron bezeichnet wird.

Einer der einfachsten diffraktiven Prozesse bei HERA ist die Produktion von ρ -Mesonen ($ep \rightarrow epY$), wobei mit Y das auslaufende Proton oder ein angeregter Zustand kleiner Masse bezeichnet wird. Durch Messung des auslaufenden Elektrons und der Zerfallsprodukte des ρ -Mesons ist die Kinematik des Prozesses vollständig bestimmt. Die Reaktion wurde im Bereich der Photoproduktion untersucht, d. h. das Elektron wird unter kleinem Winkel gestreut und das ausgetauschte Photon ist damit quasi reell ($Q^2 \sim 0$). Für das Quadrat des Viererimpulsübertrages auf das Proton, t , wurden jedoch hohe Werte ($1.5 < t < 10 \text{ GeV}^2$) untersucht.

Theoretisch kann man den Prozess derart beschreiben, dass das ausgetauschte Photon in ein Zweiquarksystem fluktuiert, das sich über den Pomeron-Austausch mit dem Proton in ein ρ Meson verwandelt. Die in diesem Experiment erreichten relativ hohen Werte von t erlauben es, den Prozess störungstheoretisch im Rahmen der QCD zu berechnen. In führender Ordnung wird ein farb-neutraler Gluonpaar ausgetauscht. In höheren Ordnungen geschieht der Austausch über Gluonleitern, welche theoretisch im Rahmen der BFKL Entwicklung beschrieben werden können. Die gemessenen Wirkungsquerschnitte werden als Funktion von t gut

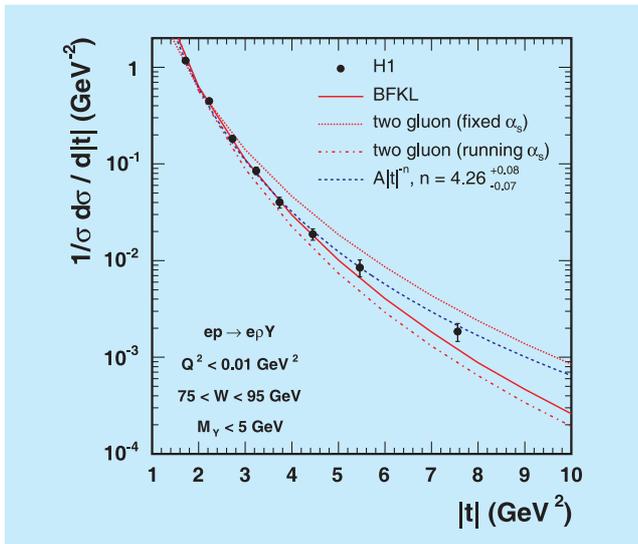


Abbildung 19: Die t -Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes des Prozesses $ep \rightarrow epY$ verglichen mit verschiedenen Vorhersagen der QCD.

von den QCD-Rechnungen beschrieben, insbesondere durch den BFKL Ansatz, wie in Abbildung 19 dargestellt ist.

Ein weiterer interessanter Aspekt dieser einfachen diffraktiven Reaktion ist die Übertragung der Helizität des ausgetauschten Photons auf das Vektormeson ρ . Das quasi reelle Photon hat nur zwei mögliche Helizitätszustände ($h = +1, -1$), während das ρ -Meson auf Grund seiner Masse in drei Helizitätszuständen $h = (+1, 0, -1)$ auftreten kann. Durch Messung der Winkelverteilungen der ρ -Produktion und des ρ -Zerfalls kann bestimmt werden, welche der theoretisch möglichen Werte für den Helizitätstransfer ($\Delta h = 0, 1, 2$) tatsächlich auftreten. Die Messungen ergeben, dass im Gegensatz zur Erzeugung von schweren Vektormesonen (wie des J/Ψ) beim ρ signifikante Beiträge von $\Delta h = 1$ und 2 vorhanden sind, was als Nicht-Erhaltung der s -Kanal-Helizität bezeichnet wird. Obwohl dies in den QCD-Modellen prinzipiell erlaubt ist, ergeben die Rechnungen quantitativ keine Übereinstimmung mit der gemessenen Größe der helizitätsverletzenden Beiträge. Es zeigt sich daher, dass die QCD-Modelle trotz der befriedigenden Beschreibung der t -Verteilung noch nicht

alle Aspekte der diffraktiven Prozesse beschreiben können.

In zwei weiteren Veröffentlichungen wurden diffraktive Streuprozesse inklusiv untersucht, d. h. es wurde dabei keine bestimmte Reaktion, wie z. B. bei der oben beschriebenen Messung, festgelegt. Die so bestimmten inklusiven diffraktiven Wirkungsquerschnitte $\sigma_r^{D(3)}(x, Q^2, x_p)$ bzw. $\sigma_r^{D(4)}(x, Q^2, x_p, t)$ hängen nicht nur von den Variablen x und Q^2 , sondern auch noch von den zusätzlichen diffraktiven Variablen x_p und t ab. Hierbei gibt x_p den Impulsanteil des Pomerons am Protonimpuls an.

In der ersten Veröffentlichung wurden diffraktive Ereignisse durch eine Lücke im Teilchenfluss (*rapidity gap*) identifiziert und der Wirkungsquerschnitt als Funktion von x , Q^2 und x_p im Bereich $3.5 < Q^2 < 1600 \text{ GeV}^2$ gemessen. Der Impulsübertrag t konnte in dieser Analyse nicht bestimmt werden. Die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von x_p wird durch $x_p^{-\alpha(t)}$ parametrisiert, mit $\alpha(t) = \alpha(0) + \alpha' t$, in Analogie zur Beschreibung von Messungen diffraktiver Ereignisse in Proton-Proton Wechselwirkungen. Der hier von H1 in tief-inelastischer diffraktiver Wechselwirkung gemessene Wert $\alpha(0) = 1.118 \pm 0.008$ liegt deutlich über dem Wert von $\alpha(0) = 1.08$ aus der Proton-Proton Streuung. Der höhere Wert kann als ein Beitrag von harter Wechselwirkung zum nicht-perturbativen Pomeron interpretiert werden.

Die Messung des inklusiven Wirkungsquerschnittes $\sigma_r^{D(3)}(x, Q^2, x_p)$ kann dafür benutzt werden, die partonische Struktur der diffraktiven Streuung zu untersuchen. Ähnlich wie im nicht-diffraktiven Fall gibt es auch für diffraktive Wirkungsquerschnitte einen Faktorisierungsansatz, der besagt, dass sich der Wirkungsquerschnitt als Faltung einer prozessunabhängigen Partondichteverteilung mit dem Matrixelement des Streuprozesses beschreiben lässt. Aus dem gemessenen Wirkungsquerschnitt $\sigma_r^{D(3)}(x, Q^2, x_p)$ wird die Partondichteverteilung im Pomeron mit Hilfe der DGLAP Entwicklung bestimmt. Die genauen Messungen erlauben zum ersten Mal auch eine Abschätzung der Unsicherheiten der Parametrisierung der Partondichteverteilungen. In Abbildung 15 ist die Quark- und

Gluon-Dichteverteilung als Funktion des Partonimpulsanteils z für verschiedene Werte von Q^2 und zwei verschiedene Parametrisierungsansätze gezeigt.

Es ist deutlich zu sehen, dass beide Parametrisierungen der Quarkverteilungen sehr ähnlich sind, da der inklusive Wirkungsquerschnitt σ_r^D direkt von ihnen abhängt. Demgegenüber unterscheiden sich die nur indirekt aus der Skalenverletzung bestimmten Gluonverteilungen im Bereich großer Werte von z erheblich. Um die Sensitivität auch in diesem Bereich zu erhöhen müssen weniger inklusive Daten, wie z. B. die Messung von diffraktiven Zweijet-Ereignissen hinzugezogen werden.

In der zweiten Analyse wurden diffraktive Ereignisse über den direkten Nachweis des gestreuten Protons im *Forward Proton Spectrometer* (FPS) gemessen. Die Luminosität von 28.4 pb^{-1} mit Signalen im FPS (aufgenommen 1999 und 2000) ist wesentlich kleiner als die der *rapidity gap* Methode. Allerdings erlaubt der Nachweis des gestreuten Protons im FPS auch die Bestimmung des Impulsübertrages t und damit auch die Messung von $\sigma_r^{D(4)}(x, Q^2, x_p, t)$. Während mit der *rapidity gap* Methode nicht unterschieden werden kann, ob das Proton intakt bleibt oder dissoziiert und ein System kleiner Masse M_Y bildet, erlaubt die FPS-Analyse durch den Protonnachweis eine eindeutige Identifikation diffraktiver Ereignisse. Die Messung des differentiellen Wirkungsquerschnittes $\frac{d\sigma}{dx_p dt}$ im Bereich von $2 < Q^2 < 50 \text{ GeV}^2$ und $x_p < 0.1$ erlaubt die Bestimmung der Pomeron-Trajektorie $\alpha(t) = \alpha(0) + \alpha' t$. Der Wert α' bestimmt das sogenannte *Shrinkage*, welches besagt, dass die Breite der t -Verteilung mit wachsender Energie des sekundären Protons, d. h. mit abnehmendem x_p , abnimmt. Dies ist ein typischer Effekt aus der weichen Hadron-Hadron Streuung. Sind hingegen perturbative Prozesse von entscheidender Bedeutung, erwartet man kein *Shrinkage*, also $\alpha' \rightarrow 0$. Die hier vorgestellte Messung ergibt $\alpha' = 0.02 \pm 0.014_{-0.09}^{+0.21}$ für den Bereich $0.0009 < x_p < 0.0094$. Dieser Wert ist kleiner als der Wert $\alpha' = 0.25$ aus weicher Hadron-Hadron Streuung, allerdings im Rahmen der systematischen Unsicherheiten noch damit verträglich. Der gemessene Wirkungsquerschnitt $\sigma_r^{D(4)}(x, Q^2, x_p, t)$ im Bereich $t < 1 \text{ GeV}^2$ wird sehr gut mit den Partondichtevertei-

lungen beschrieben, die aus der *rapidity gap* Methode bestimmt wurden, was eine Bestätigung des Faktorisierungsansatzes darstellt. Darüber hinaus konnte der Anteil von Protodissoziation in den mit der *rapidity gap* Methode bestimmten Querschnitten experimentell zu etwa 20% ermittelt werden.

In einer weiteren Analyse wurden diffraktive Ereignisse untersucht, bei denen schwere Quarks (Charm) erzeugt wurden. Es wurden D^* -Mesonen in Photoproduktion ($Q^2 \sim 0$) und in tief-inelastischer Streuung im Bereich $2 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$ gemessen, welche über $D^* \rightarrow D^0 \pi \rightarrow K \pi \pi$ zerfallen. Mit einer zweiten Nachweismethode wurde die Vertexverteilung geladener Spuren gemessen, die aufgrund der endlichen Lebensdauer vom Nullpunkt verschoben ist (*displaced track*), wenn schwere Quarks produziert werden. Sowohl in der tief-inelastischer Streuung, als auch in der Photoproduktion, wird der gemessene Wirkungsquerschnitt als Funktion der Variablen des D^* -Mesons gut von Vorhersagen beschrieben, welche auf den aus $\sigma_r^{D(3)}(x, Q^2, x_p)$ bestimmten Partondichteverteilungen beruhen. Dies ist eine sehr wichtige Beobachtung, da sie direkt den oben beschriebenen Faktorisierungsansatz bestätigt. Die Photoproduktion von Jets, wie auch diffraktive Ereignisse der pp Streuung am Tevatron, lassen sich dagegen nicht mit diesen Partondichteverteilungen beschreiben, was eine Abweichung von dem Faktorisierungsansatz bedeutet.

Wenn man das Pomeron als ein 2-Gluon-System begreift und daher die Wahrscheinlichkeit für seinen Austausch als proportional zum Quadrat der Gluondichte im Proton annimmt, lässt sich der gemessene Wirkungsquerschnitt der D^* -Produktion ebenfalls gut beschreiben. Dies bedeutet, dass man auch ohne Einführung neuer diffraktiver Partondichten die Diffraktion als einen speziellen Zustand mehrerer Gluonen des Protons auffassen kann. In Abbildung 20 wird der differentielle Wirkungsquerschnitt für diffraktive D^* -Produktion als Funktion des Transversalimpulses des D^* und seiner Pseudorapidität mit verschiedenen Modellrechnungen verglichen.

Mit der Methode der *displaced tracks* konnte das Verhältnis von diffraktiver Charm Produktion zu in-

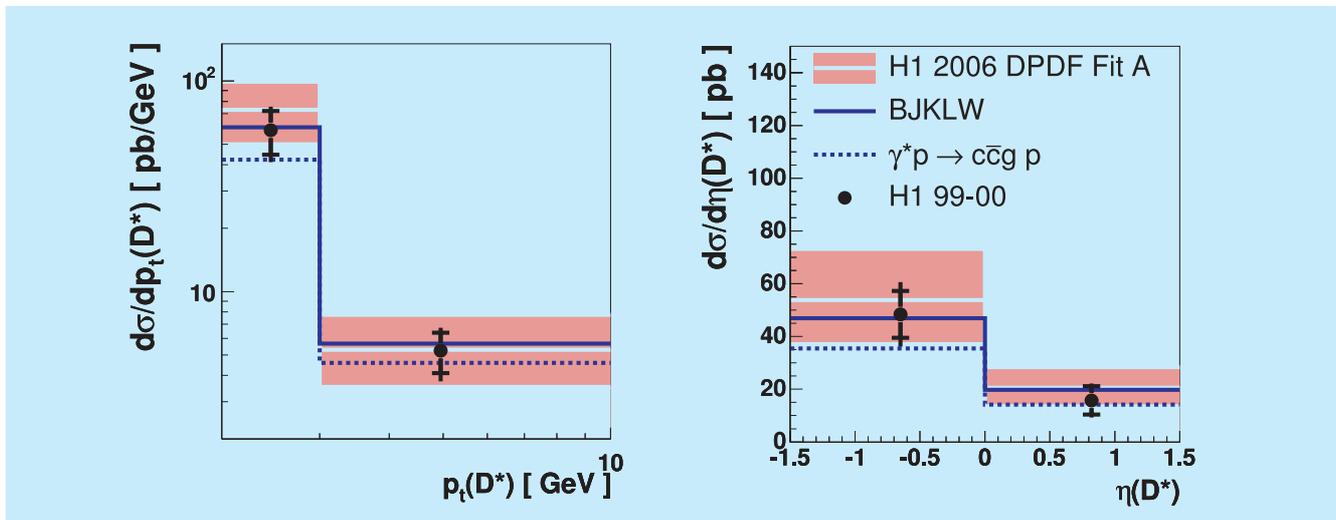


Abbildung 20: Differentieller Wirkungsquerschnitt für diffraktive D^* Produktion in DIS als Funktion des Transversalimpulses, p_t , und der Pseudorapidität, η , verglichen mit Rechnungen basierend auf diffraktiven Partondichten (DPDF Fit A) und solchen basierend auf dem 2-Gluon Modell (BJKLW).

klusiver Diffraction im gleichen kinematischen Bereich zu $f_{\text{diff}}^{\text{cc}} \sim 20\%$ bestimmt werden. Ein ähnlicher Charm-Anteil wurde von H1 in nicht-diffraktiven Ereignissen bei kleinem x und vergleichbarem Q^2 gemessen.

Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

Im Berichtsjahr wurde in drei Veröffentlichungen über die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells berichtet. Eine Veröffentlichung beinhaltet die Suche nach doppelt geladenen Higgsbosonen, eine andere die Suche nach Teilchen, die aus fünf Quarks (Pentaquarks) aufgebaut sind. In einer weiteren Veröffentlichung werden Tau-Leptonen zur Suche nach neuer Physik benutzt.

Im Jahre 2003 wurde in einer H1 Analyse von HERA I Daten im Zweielektronkanal bei hoher invarianter Masse ein Überschuss von Daten relativ zur Standardmodellerwartung beobachtet. Multileptonereignisse sind unter anderem deshalb interessant, weil sie auf Physik jenseits des Standardmodells sensitiv sind. Im Rah-

men des Standardmodells wird die Erzeugung von Masse durch die Existenz eines hypothetischen neutralen Higgsbosons erklärt. In erweiterten Higgsmodellen treten auch geladene Higgsbosonen auf, so auch zweifach positiv oder negativ geladene. Diese können aufgrund von Ladungserhaltung nur in Leptonpaare zerfallen. Diese Tatsache macht es interessant, nach Leptonpaaren aus Higgszerfällen zu suchen. Die aus vorangegangenen Experimenten bekannten Grenzen auf den Produktionswirkungsquerschnitt schliessen die Möglichkeit eines Nachweises bei HERA nicht aus. Es wurden die gesamten HERA I Daten, die einer integrierten Luminosität von 118 pb^{-1} entsprechen, analysiert. Hierbei wurde in den Zweieleptonkanälen ee , $e\mu$ und $e\tau$ in der invarianten Masse nach Überhöhungen relativ zur Standardmodellerwartung gesucht. Die Selektionskriterien für die Higgsuche erfüllten nur drei Ereignisse im ee -Kanal, ein Ereignis im $e\mu$ -Kanal und ein Ereignis im $e\tau$ -Kanal. Diese Ereigniszahlen sind mit der Erwartung für Untergrundprozesse kompatibel. Aus der Nichtbeobachtung eines Higgs-Signals konnten Grenzen auf die Kopplungsstärke der zweifach geladenen Higgsteilchen an Leptonen als Funktion der Masse abgeleitet werden. Dies ist in Abbildung 21 für

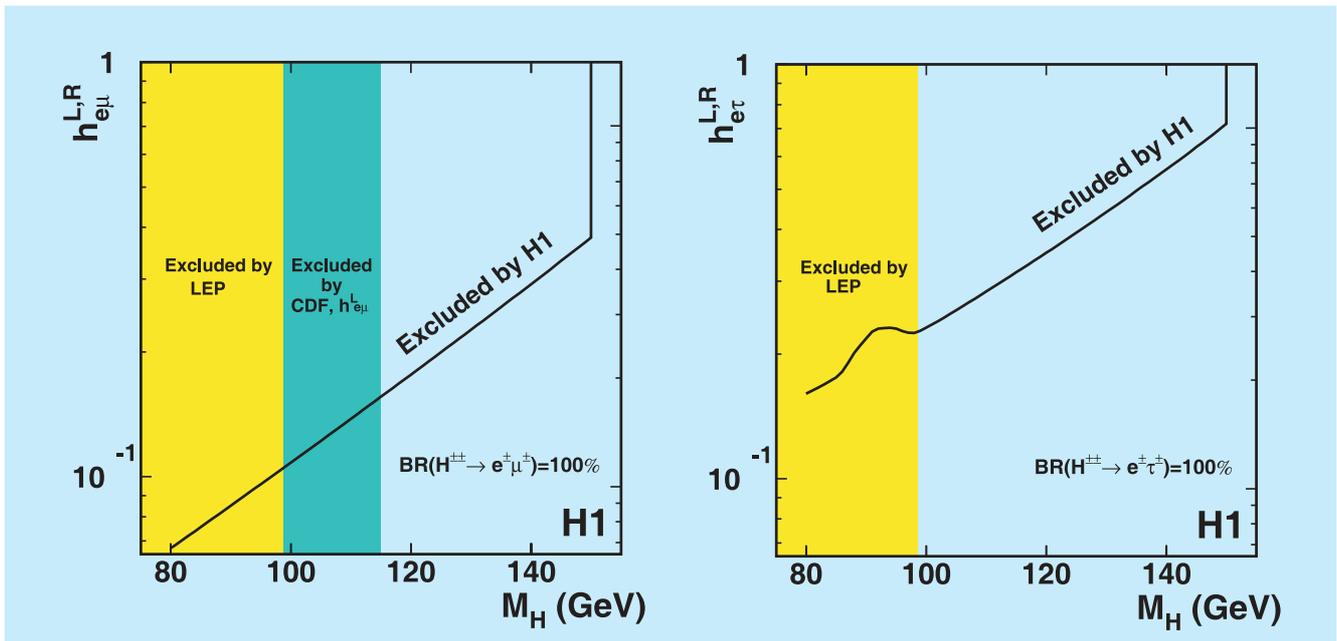


Abbildung 21: Obere Grenzen auf die Kopplung eines zweifach geladenen Higgs an $e\mu$ (links) und $e\tau$ (rechts) als Funktion der Higgsmasse. Von LEP und CDF ausgeschlossene Bereiche sind ebenfalls angegeben.

die $e\mu$ - und $e\tau$ -Kopplung gezeigt. In beiden Kanälen erweitert die Messung den ausgeschlossenen Bereich relativ zu früheren Messungen bei LEP und CDF zu hohen Massen hin beträchtlich. Zum Beispiel sind für eine Kopplung von elektromagnetischer Stärke Higgsmassen unterhalb von 141 GeV (112 GeV) im $e\mu$ ($e\tau$) Kanal ausgeschlossen.

Sehr große Aufmerksamkeit erregte im Jahr 2003 die in einigen Experimenten gemachte Beobachtung von Zuständen, die mit der Erzeugung von sogenannten Pentaquarks verträglich sind. Pentaquarks sind Hadronen, die aus fünf Quarks aufgebaut sind; im Gegensatz zu den bekannten Mesonen, die aus zwei bzw. den Baryonen, die aus drei Quarks bestehen. Der zweifelsfreie Nachweis von Pentaquarks gelang jedoch nicht, da es andere Experimente gab, die das Signal trotz ausreichender Sensitivität nicht bestätigen konnten. Insofern war es interessant, auch bei HERA nach solchen Zuständen zu suchen. Das ZEUS Experiment veröffentlichte 2004 Evidenz für die Erzeugung von Strangeness enthaltenden Pentaquarks in der ep Streuung im $K^0 - (\text{Anti})\text{Proton}$ Zerfallskanal.

Die neue H1 Analyse sucht im selben Kanal ebenfalls nach einer schmalen Resonanzüberhöhung in der invarianten Masse des $K^0 - (\text{Anti})\text{Proton}$ Systems. Verwendet wurden hierzu alle in den Jahren 1996 bis 2000 aufgenommenen Daten. Ereignisse mit gestreuten Elektronen im Bereich $5 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$ wurden selektiert. Das K^0 wurde in der zentralen Spurkammer (CJC) über seinen Zweipionzerfall nachgewiesen. Das Proton (Antiproton) wurde über die spezifische Ionisation dE/dx in der CJC identifiziert. Es wurde in den Daten keine signifikante Resonanzstruktur über der Untergrunderwartung nachgewiesen. Dies gilt, wie in Abbildung 22 gezeigt, auch für hohe Q^2 und limitierte Protonimpulse, einem Bereich, in dem ZEUS Evidenz für das Pentaquark-Signal hat. Aus der Nichtbeobachtung eines Signals wurden von H1 obere Grenzen für das Produkt aus Produktionswirkungsquerschnitt und Zerfallsverhältnis in $K^0 - (\text{Anti})\text{Proton}$ ermittelt. Diese obere Grenze ist ebenfalls in Abbildung 22 eingezeichnet.

Ereignisse mit Leptonen sind besonders gut geeignet, um nach Physik jenseits des Standardmodells zu su-

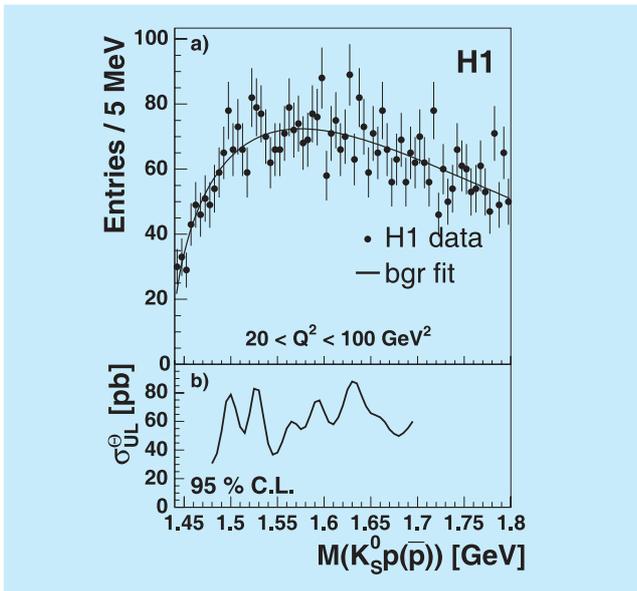


Abbildung 22: Oben: Anzahl der Ereignisse als Funktion der invarianten K_S^0 Masse. Die durchgezogene Linie zeigt das Ergebnis einer Anpassung einer empirischen Untergrundfunktion an die Daten. Unten: Obere Grenze (95% CL) für das Produkt aus Produktionswirkungsquerschnitt und Zerfallsverhältnis des Pentaquarks.

chen. In der Vergangenheit hat H1 nach Anomalien in den Zweileptonkanälen ee und $\mu\mu$ gesucht. Eines der spektakulärsten Ergebnisse von HERA ist jedoch die Beobachtung eines gewissen Überschusses von Ereignissen mit einem Elektron oder Muon und unausgeglichenem gesamten Transversalimpuls. Diese Untersuchungen wurden nun auch auf Leptonen der dritten Familie, die τ 's, ausgedehnt. Hierzu wurden alle bei HERA I gewonnenen Daten auf die Existenz von Ereignissen mit τ -Paaren bzw. auf transversal unbalancierte τ -Ereignisse untersucht. τ -Paare werden im Standardmodell dominant über Photon-Photon-Fusionsprozesse produziert. Diese liefern dann τ 's mit relativ niedrigem Transversalimpuls. Transversal unbalancierte τ -Ereignisse werden dagegen dominant aus leptonen W-Zerfällen erwartet, die aufgrund der hohen W Masse τ 's mit hohen Transversalimpulsen erzeugen.

Nach τ -Paarproduktion wurde sowohl in leptonen als auch in hadronischen τ -Zerfallskanälen gesucht.

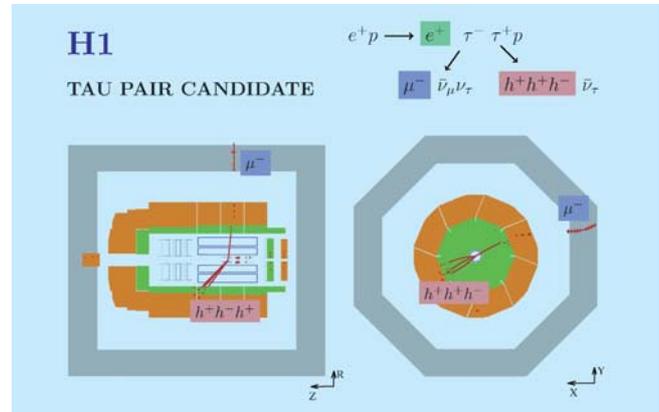


Abbildung 23: Ein τ -Paarereignis, in dem ein τ muonisch und das andere τ hadronisch zerfällt.

Untergrundprozesse wurden erfolgreich mit Hilfe neuronaler Netze eliminiert. Es gelang, 30 τ -Paarkandidaten zu isolieren, wobei insgesamt 27.1 ± 4.1 Ereignisse im Standardmodell erwartet werden, bei einem τ -Paarbeitrag von 16.0 ± 3.4 Ereignissen. Abbildung 23 zeigt ein τ -Paarereignis, in dem ein τ muonisch und das andere τ hadronisch zerfällt. Dieses ist die erste Messung der τ -Paarproduktion in der Elektron-Proton-Streuung. Aus der Ereignisrate wurde ein Produktionswirkungsquerschnitt von $\sigma = 13.6 \pm 4.4 \pm 3.7$ pb bestimmt, was mit der Erwartung von $\sigma = 11.2 \pm 0.3$ pb gut übereinstimmt.

Die Suche nach Ereignissen mit transversal unbalancierten τ 's beschränkt sich auf hadronische τ -Zerfälle. Hier wird verlangt, dass der hadronische Zerfall nur ein geladenes Teilchen beinhaltet und einen stark kollimierten Teilchenjet im Detektor hinterlässt. Eine Selektion analog zu der früher publizierten Suche nach Ereignissen mit transversal unbalancierten Elektronen oder Muonen ergab sechs Ereignisse in guter Übereinstimmung mit der Erwartung des Standardmodells. Im Bereich hoher hadronischer Transversalimpulse, wo im e - und μ -Kanal ein Überschuss an Ereignissen gesehen wurde, zeigten sich im τ -Kanal keine Ereignisse. Aufgrund der geringen Akzeptanz und des hohen Untergrundes im τ -Kanal steht dieses Resultat jedoch quantitativ nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen im e - und μ -Kanal.

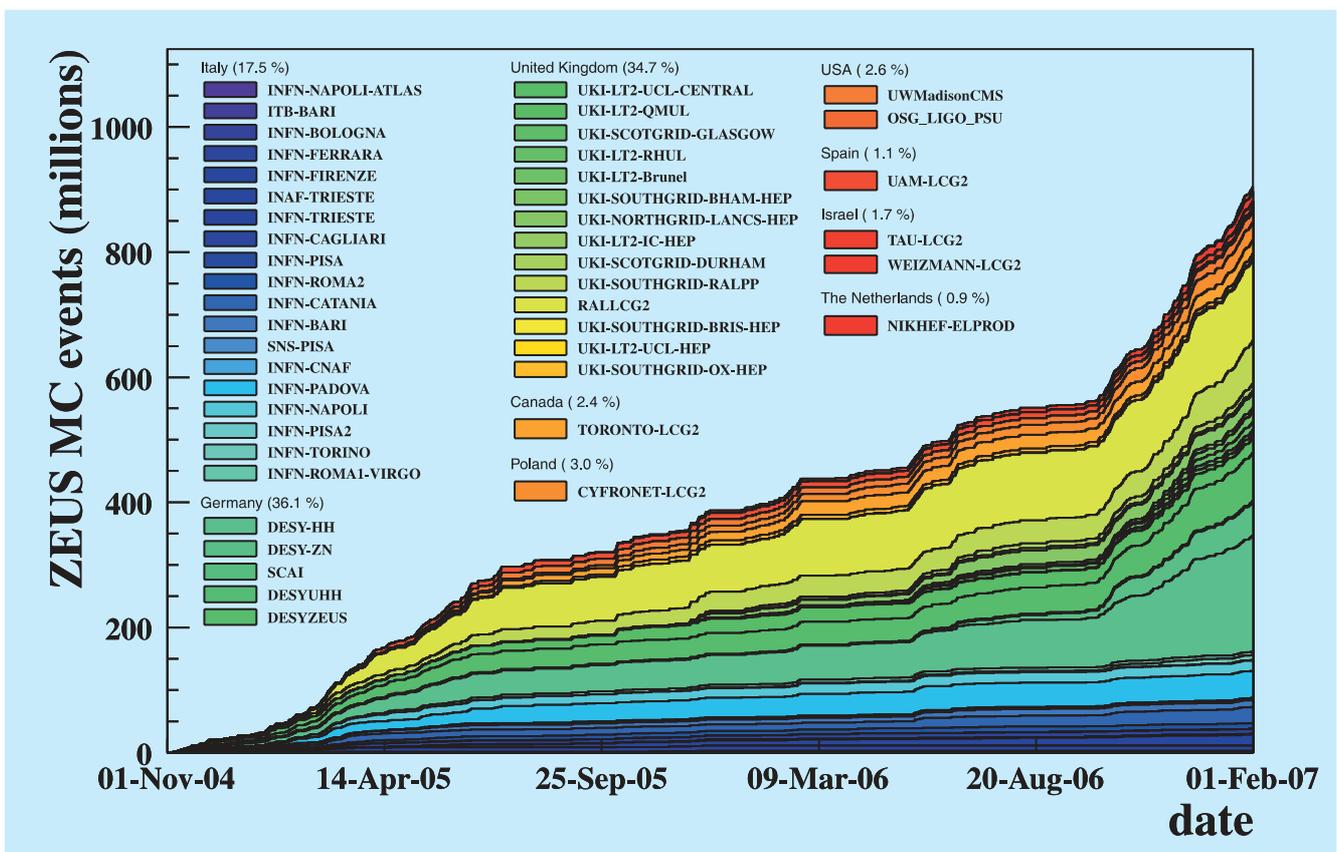


Abbildung 24: Produktion von simulierten ZEUS Ereignissen auf dem GRID.

ZEUS-Experiment

Beteiligte Institute: Univ. of the Aegean Chios, Inst. Phys. Technol. Almaty, NIKHEF und Univ. Amsterdam, ANL Argonne, Humboldt Univ. Berlin, Andrews Univ. Berrien Springs, Univ. und INFN Bologna, Univ. Bonn, Univ. Bristol, Panjab Univ. Chandigarh, RAL Chilton, Ohio State Univ. Columbus, Univ. della Calabria und INFN Cosenza, Inst. of Nucl. Physics und Jagellonian Univ. Cracow, AGH Univ. Cracow, Univ. und INFN Firenze, Univ. Freiburg, Univ. Glasgow, DESY und Univ. Hamburg, Columbia Univ. Irvington, Univ. Malaya Kuala Lumpur, Chonnam Nat. Univ. Kwangju, Univ. Lodz, Imperial Coll. und Univ. Coll. London, Univ. Cathol. de Louvain, Univ. of Wisconsin Madison, Univ. Autónoma Madrid, McGill Univ. Montreal, Engin. Phys. Inst. und State Univ. Moscow, MPI München, York Univ. North York, Oxford Univ., Univ. und INFN Padova, Weizmann Inst. Rehovot, Univ. La Sapienza und INFN Roma, Polytech. Univ. Sagamihara, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Inst. of Technol. Tokyo, Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. del Piemonte Orientale Novara, Univ. Toronto, KEK Tsukuba, Pennsylvania State Univ. University Park, Inst. for Nucl. Stud. und Univ. Warschau, Meiji Gakuin Univ. Yokohama, DESY Zeuthen.

Sprecher: E. Gallo, INFN Firenze, Italien

Das Jahr 2006 begann für ZEUS und HERA mit einer Betriebsunterbrechung während der zum letzten Mal größere Umbauten und Verbesserungen an Detektor und Maschine vorgenommen wurden.

Daran anschließend wurde der sehr erfolgreiche Elektron-Proton Betrieb fortgesetzt. In dieser ersten Jahreshälfte wurden Daten mit einer integrierten Luminosität von 61 pb^{-1} aufgezeichnet. Damit stehen ZEUS nunmehr 215 pb^{-1} Elektron-Proton Daten zur Verfügung, das sind mehr als zehnmals so viele Daten wie bisher. Entsprechend dominierten die Arbeiten an diesen Daten die Analyse im Jahr 2006. Bei Positron-Proton Betrieb in der zweiten Jahreshälfte erreichte ZEUS eine sehr hohe Effizienz von 90%.

In den Analysen der Daten, welche im HERA II Run aufgezeichnet wurden, sind signifikante Entwicklungen und Schritte erreicht worden. Die gewonnenen Erkenntnisse und Entwicklungen sind nicht nur maßgeblich für das Fortschreiten der neuen Analysen, sondern tragen auch wesentlich zu Verbesserungen der laufenden Analysen der HERA I Daten bei.

Im Berichtszeitraum erfolgte die Publikation der ersten vollständig abgeschlossenen Analyse mit HERA II Daten.

ZEUS Betrieb

Bei der Betriebsunterbrechung zu Anfang des Jahres ging es vorrangig um die Reparatur des Straw-Tube-Trackers (STT) sowie um die Verbesserung der Kühlung von dessen Ausleseelektronik. Diese Arbeiten waren nötig, da es sich gezeigt hatte, dass bei längerem Betrieb des STT die unmittelbare Umgebung und damit insbesondere die zentrale Spurkammer und der supraleitende Solenoid durch die Abwärme gefährdet wurden. Diese Arbeiten konnten planmäßig ausgeführt und abgeschlossen werden, sodass der STT in der im Februar begonnen Datennahmeperiode ohne eine Beeinträchtigung anderer Teile des Detektors routinemäßig betrieben werden konnte. Darüber hinaus wurden große Teile des Hadron-Elektron Separators

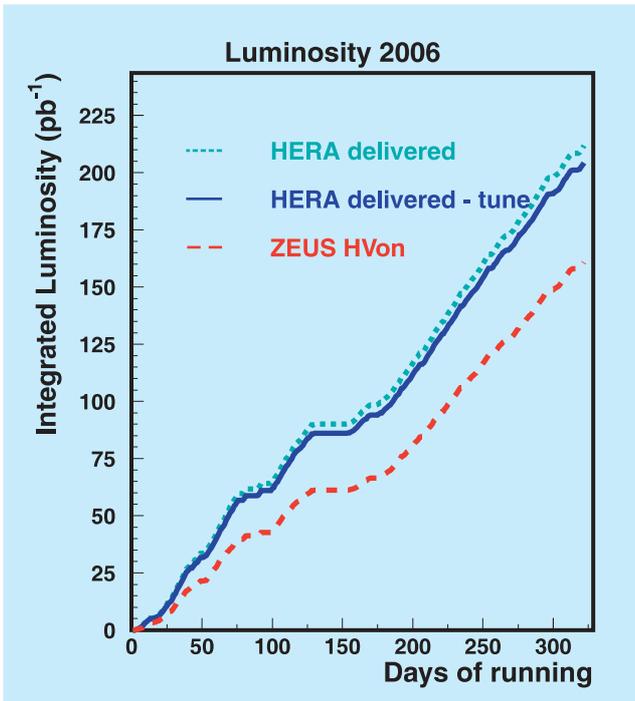


Abbildung 25: Die von HERA im Jahr 2006 für ZEUS gelieferte Luminosität.

(HES) im Vorwärtsteil des Uran-Kalorimeters repariert. Insbesondere mussten 5 sogenannte HES-Skis aus dem Uran-Kalorimeter gezogen, repariert und wieder installiert werden. Auch diese Arbeiten konnten im Zeitplan erledigt werden.

Zusätzlich wurden allgemeine vorsorgende Wartungsarbeiten durchgeführt, um zu erreichen, dass die folgende letzte Datennahmepériode von HERA mit höchster Effizienz durchgeführt werden kann. Beispielhaft dafür seien hier erwähnt:

- Verbesserung der Hochspannungsversorgung im Uran-Kalorimeter,
- Installation einer neuen Ausleseelektronik im RADMON System mit dem Ziel, den Schutz des Mikrovertexdetektors bei hoher Strahlenbelastung zu verbessern,
- Überprüfen und Beschaffen von Ersatzteilen für eine Vielzahl kritischer Komponenten.

Nach Abschluss dieser Arbeiten begann am 17. Februar der zweite Teil der Datennahme mit Elektronen, der bis zum 25. Juni andauerte. In diesem Zeitraum lieferte HERA 86 pb^{-1} von denen ZEUS 61 pb^{-1} aufzeichnen konnte. Daran anschließend wurde wieder auf Positron-Strahlbetrieb umgeschaltet und unter diesen Bedingungen ohne Unterbrechungen, sogar über den Jahreswechsel 2006/2007, Daten genommen. Die im gesamten Jahr 2006 gelieferte Datenmenge ist in Abbildung 25 dargestellt.

Simulation, Rekonstruktion und Analyse

Das wachsende Volumen der ZEUS Daten bedeuten für Simulation, Archivierung, Rekonstruktion und Analyse neue Herausforderungen. Konkret heisst das zum Beispiel, dass es zunehmend schwieriger wird, die nötige Rechenleistung an einem Ort zur Verfügung zu stellen. Bei ZEUS wurde daher frühzeitig damit begonnen, insbesondere die Simulation auf möglichst viele Rechner weltweit zu verteilen. Das von ZEUS entwickelte System, das diese Aufgaben realisiert, trägt den Namen *Funnel*. Funnel nahm gewissermassen die Ideen des *Computing Grid* vorweg, lange bevor es im Rahmen des LHC Computing realisiert wurde. Inzwischen stellt sich allerdings heraus, dass die für Funnel zugänglichen Rechner weniger werden, in dem Maße, in dem sich das LHC Computing GRID ausdehnt. Aus diesem Grund wurde Funnel technisch dem LHC Computing GRID angepasst, um auch auf längere Zeit Zugang zu ausreichenden Rechnerressourcen für ZEUS zu garantieren. Diese Aktivität stellte sich als ein durchschlagender Erfolg heraus. Durch diese Umstellung konnten die für ZEUS verfügbaren Simulationsressourcen nahezu verzehnfacht werden. Diese Entwicklung wird besonders durch Abbildung 24 verdeutlicht, die die Anzahl der simulierten Ereignisse als Funktion der Zeit zeigt. Der steile Anstieg nach August 2006 zeigt die Verbesserung durch die Umstellung des ZEUS Funnel Systems auf die Nutzung des GRID.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtszeitraum erwiesen sich die Daten des HERAI Runs als stetig sprudelnde Quelle für eine Fülle an neuen Ergebnissen. Dabei kamen vorwiegend erstmalige Analysen zu bislang unberührten Untersuchungsschwerpunkten zum Tragen. Neu entwickelte Analysetechniken ermöglichten dabei zum einen vorher nicht durchführbare Studien und zum anderen signifikante Verbesserungen von bereits früher publizierten Ergebnissen.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die gegenseitigen Wechselwirkungen von sub-atomaren Teilchen mit Hilfe von drei der vier bekannten Kräfte, der elektro-magnetischen, der schwachen (vereinheitlicht in der elektro-schwachen Kraft) und der starken Kraft. Zur Einbeziehung der vierten Kraft, der Gravitation, existieren verschiedene theoretische Modelle, die unterschiedliche Vorhersagen machen, welche erst mit höheren Energien, mit äußerst seltenen Prozessen oder der Beobachtung von exotischen Teilchen experimentell überprüft werden können. Doch auch Vorhersagen des gegenwärtigen Standardmodells mit seinen drei Kräften, sind Gegenstand von intensiven Studien mit experimentellen Messungen, denn auch nur kleinste Abweichungen können indirekt auf mögliche Erweiterungen zur vollständigen Theorie hindeuten. Außerdem gibt es im Rahmen des Standardmodells, das in seiner derzeitigen Form schon seit rund 25 Jahren die Basis der Teilchenphysik bildet, Eigenschaften der Wechselwirkungen und der Teilchen, die in ihrer Struktur aber nicht in ihrem Wert fest gelegt sind. Deshalb müssen verschiedene Parameter des Standardmodells und die Struktur von Teilchen durch präzise Messungen experimentell mit höchstmöglicher Genauigkeit bestimmt werden.

In diesem Zusammenhang tragen die veröffentlichten elf Publikationen des Berichtszeitraumes zu dem Verständnis in vier Bereichen bei:

- Messung von Parametern der elektro-schwachen Wechselwirkung (1),
- Messung der Struktur des Protons (2),

- Überprüfung von Vorhersagen der starken Wechselwirkung (7),
- Suche nach exotischen Teilchen in theoretischen Erweiterungen des Standardmodells (1).

Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Messung von Parametern der elektro-schwachen Wechselwirkung

In den Streuereignissen bei HERA werden sogenannte Leptonen, Elektronen, bzw. deren Anti-Teilchen, Positronen, an Protonen gestreut. Strahlt in diesem $e^\pm p$ -Streuprozess das Lepton ein Photon oder, vermehrt bei höheren Impulsüberträgen Q^2 , ein Z-Boson, ab, welches dann mit einem Quark oder Gluon im Proton wechselwirkt, spricht man von einem neutralen Strom (*neutral current*, NC) Ereignis. Strahlt das Lepton ein geladenes W-Boson ab, so bezeichnet man dieses als Ereignis des geladenen Stromes (*charged current*, CC). In der Theorie der elektro-schwachen Wechselwirkung stellt die Spin-Struktur der Kopplungen der neutralen und der geladenen schwachen Ströme eine grundlegende Eigenschaft dar. Nur links-händige Teilchen (Elektronen), bzw. rechts-händige Anti-Teilchen (Positronen) können an ein W-Boson koppeln. Dabei spricht man von Links-Händigkeit, wenn der Eigendrehimpuls (Spin) des Teilchens in Bewegungsrichtung zeigt, bzw. von Rechts-Händigkeit im umgekehrten Fall. Schon im letzten Jahresbericht wurden Messungen mit Ereignissen des geladenen Stroms beschrieben, die zeigen, dass diese Eigenschaft die Natur exakt widerspiegelt.

In der ersten Veröffentlichung, deren Analyse die neuen HERA II Daten zu Grunde liegen, wird eine weitere Eigenschaft der Spin-Struktur der schwachen Kopplung getestet. Die neuen HERA II Daten ermöglichen den Zugang zu den statistisch seltener auftretenden Streuereignissen mit höheren Impulsüberträgen. Dabei erwartet man, dass die Stärke der Wechselwirkung von der Skala, dem negativen Quadrat des Vierer-Impulses, Q^2 , abhängt. Im Bereich von $Q^2 > 10^4 \text{ GeV}^2$ ist die schwache Wechselwirkung vergleichbar stark wie die

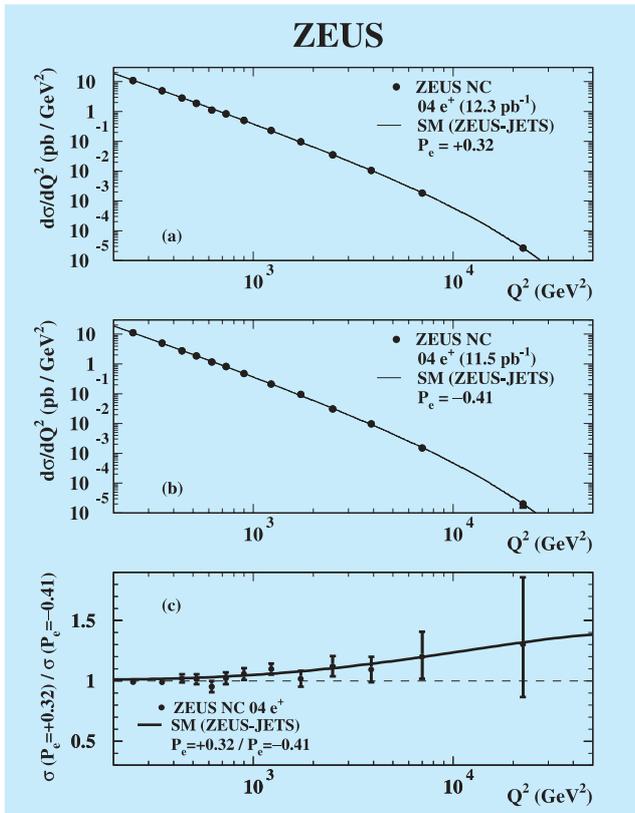


Abbildung 26: Wirkungsquerschnitt für Wechselwirkungen des neutralen Stroms in der tief-inelastischen e^+p -Streuung in Abhängigkeit vom mittleren Q^2 für zwei mittlere Werte des Polarisationsgrade der Positronen (Punkte), im Vergleich mit der Vorhersage der elektro-schwachen Theorie (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie markiert die Erwartung für das Verhältnis der Messungen bei den beiden verschiedenen Polarisationsgraden, wenn es keine Abhängigkeit von der Polarisierung gäbe.

elektro-magnetische Wechselwirkung und dieser Messbereich eignet sich insbesondere, um die Vorhersagen der vereinheitlichten elektro-schwachen Theorie zu testen. Diese HERA Ergebnisse sind komplementär zu denen von LEP am CERN. Sie vermitteln einen Einblick in einen anderen kinematischen Bereich. Deshalb stellen diese neuen Messungen erstrangige und entscheidende Ergebnisse dar, die sehr schnell ihren Eingang in die Lehrbücher finden.

Bei hohen Werten von Q^2 sagt das Standardmodell voraus, dass im neutralen Strom vermehrt Z-Bosonen anstelle von Photonen ausgetauscht werden. Dabei hängt die Häufigkeit der Wechselwirkung auf andere Weise von der Polarisierung der Leptonen ab. In den HERA II Daten ist genügend Statistik für verschiedene mittlere Polarisationsgrade vorhanden, so dass zwei verschiedene Datensätze mit unterschiedlicher Polarisierung untersucht werden konnten. Abbildung 26 zeigt den Wirkungsquerschnitt als Funktion von Q^2 für die beiden analysierten Konfigurationen und vergleicht im untersten Bild ihr Verhältnis mit der Vorhersage des Standardmodells. Die Daten des neutralen Stroms befinden sich in exzellenter Übereinstimmung mit der Vorhersage. Ein wichtiger Bestandteil der Vorhersagen des Standardmodells ist hierbei die Struktur des Protons, für die eine früher veröffentlichte Messung des ZEUS-Experimentes verwendet wurde. Im nächsten Abschnitt werden zwei neue Messungen in diesem Bereich beschrieben.

Bestimmung der Strukturfunktion des Protons

Die Struktur des Protons kann aufgrund mathematischer Schwierigkeiten bislang nicht aus dem Standardmodell abgeleitet werden, sie geht aber als wichtiger Bestandteil in viele Vorhersagen ein. Eine der wichtigsten Motivationen für Streuexperimente mit dem HERA Speicherring, war und ist es immer noch, den Aufbau des Protons aus Partonen, den verschiedenen Arten von Quarks und den Binde-Teilchen den Gluonen, präzise zu vermessen. Generell wird die Struktur von Teilchen mit den sogenannten Parton-Dichten parameterisiert, welche die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der jeweiligen Partonen als Funktion ihres Impulsbruchteiles am Teilchenimpuls, x , und Q^2 in der Streuung angeben. Q^2 ist dabei in diesem Zusammenhang ein Maß für die Auflösung, mit der man, wie in einem Mikroskop die kleinsten Bestandteile im Proton auflösen kann. Je höher Q^2 , desto besser die Auflösung, aber auch desto seltener die Streuprozesse. Während mit den unschätzbaren Beiträgen von HERA im Bereich von kleinen x das Verständnis schon sehr weit fortgeschritten ist, gibt

es bei hohen Impulsbruchteilen, $x \rightarrow 1$, kaum Messungen weder von HERA noch von anderen Experimenten. Es ist eine Herausforderung einen solchen Zustand in dem ein einziges Parton praktisch den gesamten Impuls des Protons übernimmt, sowohl experimentell zu messen und als auch theoretisch zu berechnen.

Eine neue Analysetechnik macht nun eine Bestimmung möglich. Diese Analyse wird schematisch in Abbildung 27 verdeutlicht. Die Herausforderung besteht darin, die Ereignisse mit hohem Q^2 , das heisst mit einem hoch-energetischen Elektron bei großen Streuwinkeln, zu analysieren. Sie sind zwar leicht zu selektieren, jedoch kann die Kinematik des Streuprozesses nicht allein mit dem Elektron bestimmt werden. In diesem Bereich ist die Auflösung des Detektors nicht fein genug. Mit Hilfe des hadronischen Endzustandes, welcher in der Abbildung als Jet bezeichnet wird, und aus einem Bündel von Hadronen (Pionen, Kaonen, Protonen...) besteht, kann die Kinematik mit ausreichender Präzision bestimmt werden. Für Streuevents mit einem Impulsbruchteil x fast an dem Wert 1, liegt der hadronische Endzustand sehr nahe an der Strahlröhre, und geht teilweise, wie auch ein Anteil des Proton-Restes, in der Abbildung mit *proton remnant* bezeichnet, verloren. Deshalb wird für diese sehr hohen Werte von x das Ergebnis über einen größeren Bereich von x integriert angegeben und in der unteren Darstellung in Abbildung 27 mit einem Kreis anstelle eines Punktes angezeigt. Die Unsicherheiten in den derzeit verfügbaren Parameterisierungen sind groß, das heisst ihre Vorhersagen weichen recht stark voneinander ab. Die neuen Messungen werden helfen, die Parton-Dichten in diesem Bereich von x genauer zu parameterisieren und die erforderlichen theoretischen Berechnungen besser zu verstehen.

Auch in der nächsten Analyse werden Ereignisse mit einem oder mehreren produzierten Jets studiert. Ein Faktorisiertheorem der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, besagt, dass der Wirkungsquerschnitt in ein Produkt aus zwei Faktoren zerlegt werden kann. Dieses Produkt besteht aus einem Term, der den partonischen Streuquerschnitt beschreibt und einem zweiten Term der die Parton-Dichte-Funktion enthält. Wie vorher

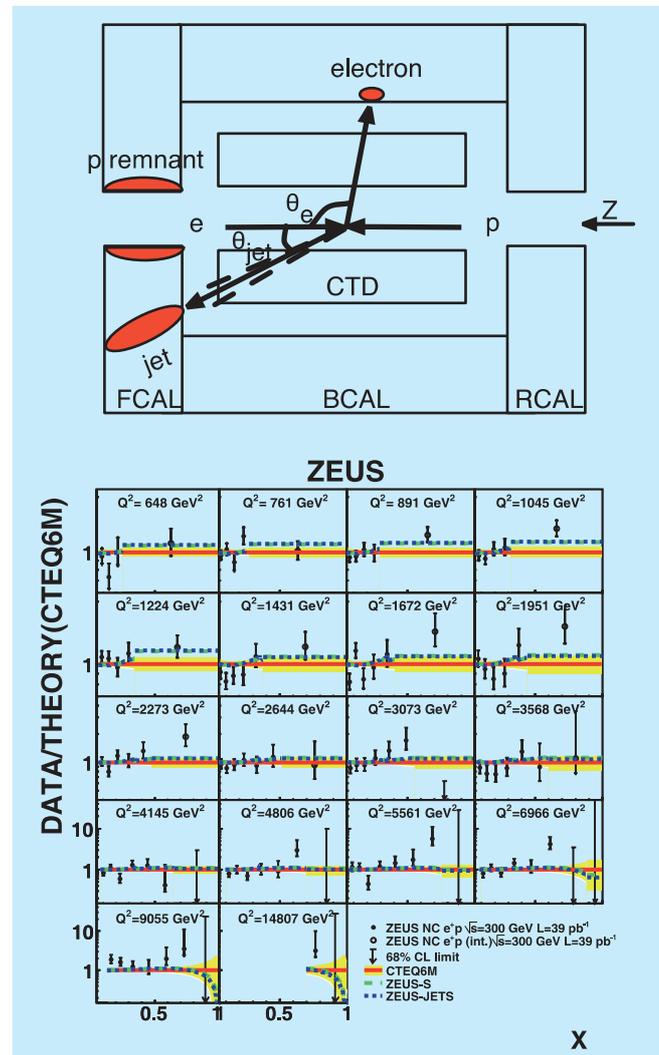


Abbildung 27: Oben: Schematische Darstellung des ZEUS Detektors mit eingezeichneter typischer Topologie der Ereignisse dieser Analyse. Die von links einlaufenden Elektronen werden unter einem großen Winkel gestreut. Unten: Verhältnis der gemessenen Daten zu den theoretischen Vorhersagen als Funktion von x für verschiedene Werte von Q^2 . Die Unsicherheiten in den theoretischen Vorhersagen, die verschiedene Parameterisierungen der Proton-Struktur verwenden, sind mit einem gelben Band gekennzeichnet. Sie sind im Bereich von x nahe 1 sehr groß.

erwähnt, lassen sich die Parton-Dichten im Standardmodell nicht berechnen, allerdings können sie, wenn eine Startverteilung gemessen wurde, mit verschied-

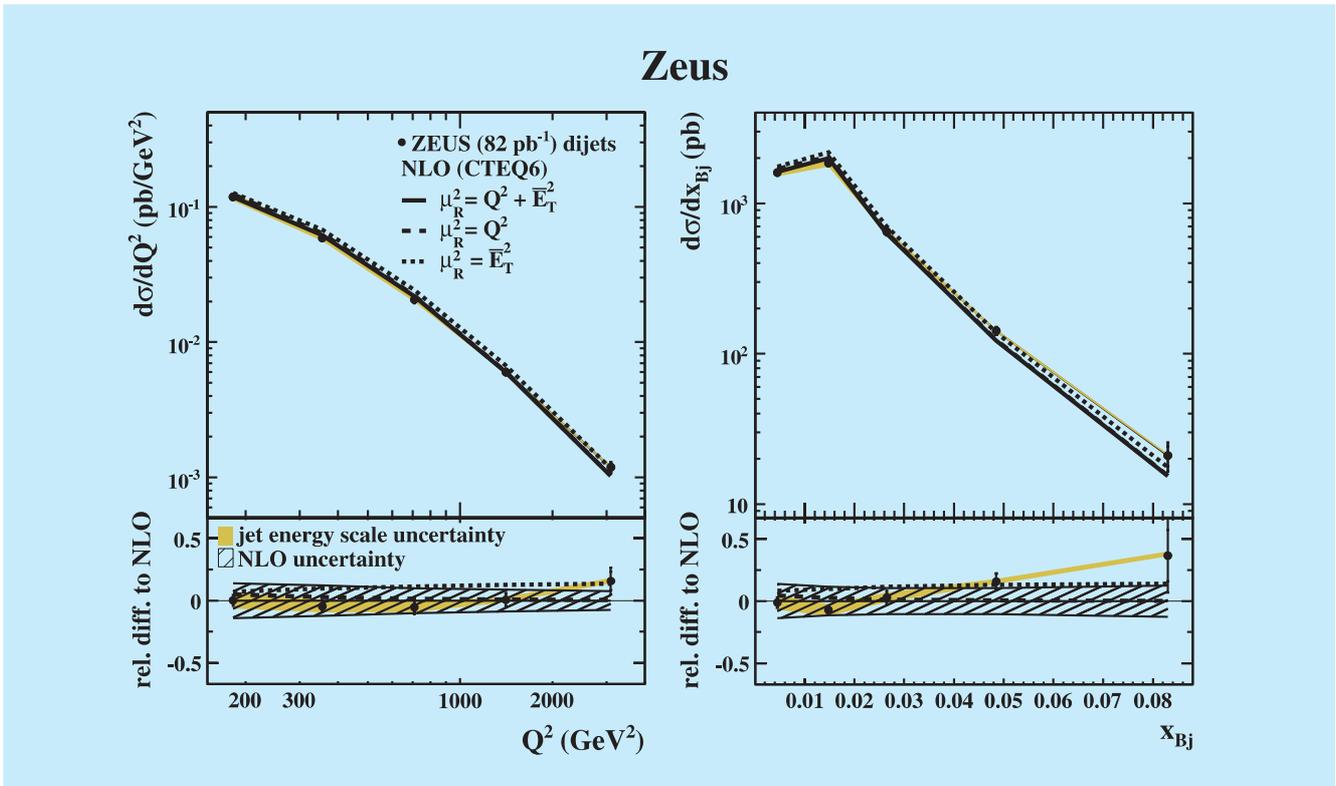


Abbildung 28: Wirkungsquerschnitte für die Produktion von zwei Jets als Funktion von Q^2 (links) und x (rechts). Die Daten (Punkte) werden mit theoretischen Vorhersagen (Linien) auf verschiedenen Skalen verglichen. Das Verhältnis von Daten zu Vorhersagen wird jeweils im unteren Abschnitt des Bildes dargestellt.

denen Ansätzen durch störungstheoretische QCD Berechnungen in andere kinematische Bereiche entwickelt werden. Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Messmethode gibt direkte Auskunft über die Quark-Dichten. Die Gluonen-Dichte dagegen ist nur indirekt über diese Entwicklungsberechnungen zugänglich. Die Produktion von Jets helfen daher, die Gluonen-Dichte im Proton mit höherer Genauigkeit zu bestimmen und die Gültigkeit der Berechnungen zu überprüfen.

Die Abbildung 28 zeigt den gemessenen Wirkungsquerschnitt für Zwei-Jet Erzeugung als Funktion von Q^2 und x . Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse einer theoretischen Berechnung eingetragen, die eine von mehreren möglichen Parameterisierungen der Proton-Struktur verwendet. Die Daten und die Be-

rechnungen sind miteinander in guter Übereinstimmung. Bei dem Vergleich zeigt sich deutlich, dass für die Daten eine exzellente Präzision erreicht wurde, die durch das gelbe Band gekennzeichnet ist. Im Gegensatz dazu bestehen in der Theorie große Unsicherheiten (schwarz-schraffiertes Band). Die Unsicherheit wird von der anzuwendenden Skala dominiert. In den Berechnungen ist es möglich, die Skala, auf der die Parton-Dichten in den relevanten kinematischen Bereich der Messung entwickelt werden, in drei verschiedenen Ansätzen zu wählen. Für die Jet-Produktion kann die Skala durch Q^2 gegeben sein, durch die transversale Energie der erzeugten Jets (E_T) oder durch eine Kombination der beiden. Um solche Unsicherheiten in den theoretischen Modellberechnungen zu verkleinern, werden große Anstrengungen, nicht nur in der Theorie, sondern auch experimentell

durch spezielle Messungen, unternommen. Beispiele solcher Messungen werden im Folgenden näher beschrieben.

Messungen für die Quantenchromodynamik

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, spielt die anzuwendende Skala in der Quantenchromodynamik eine bestimmende Rolle, denn von ihrer Größe wird das Verhalten der starken Kraft bestimmt. Die Abhängigkeit der starken Kopplung α_s von der Skala führt bei größeren Impulsüberträgen Q^2 , gleich bedeutend mit kleinen Abständen, zur asymptotischen Freiheit der stark wechselwirkenden Partonen. Jedoch bei kleinen Impulsüberträgen, großen Abständen entsprechend, führt sie zum sogenannten *Confinement* der Quarks und Gluonen. Aufgrund der extremen Stärke der Kopplung bei großen Abständen können die in der Streuung erzeugten Quarks und Gluonen nicht frei existieren, sondern binden sich zu Hadronen zusammen. Dieser Prozess wird auch Hadronisierung genannt. In den Messungen werden anschließend nah beieinanderliegende Hadronen zu Jets zusammengefasst. Abbildung 29 verdeutlicht mit welcher hoher Genauigkeit die starke Kopplung in Abhängigkeit von der Skala, hier des Transversal-Impulses der Jets (E_T), mit den Jet-Daten bei HERA bestimmt werden kann. Weitere verschiedene Methoden stehen zur Verfügung, so dass letztendlich die HERA Daten zur präzisesten experimentellen Bestimmung dieser fundamentalen Größe führen.

Die Reduzierung der Unsicherheit in der Bestimmung der starken Kopplung ist extrem wichtig für die Teilchenphysik, sowohl im übergreifenden Bild der Kräfte als auch im Rahmen der QCD. Der Verlauf ihrer Stärke hat direkten Einfluss auf die Extrapolation der drei Kräfte im Standardmodell bis hin zur Planck-Skala zur Vereinheitlichung aller vier Kräfte. Innerhalb der QCD spielt die fundamentale starke Kopplung α_s eine zentrale Rolle, denn die Wirkungsquerschnitte für starke Wechselwirkungen werden zur Vereinfachung der hoch-komplexen Ausdrücke in Potenzreihen von α_s

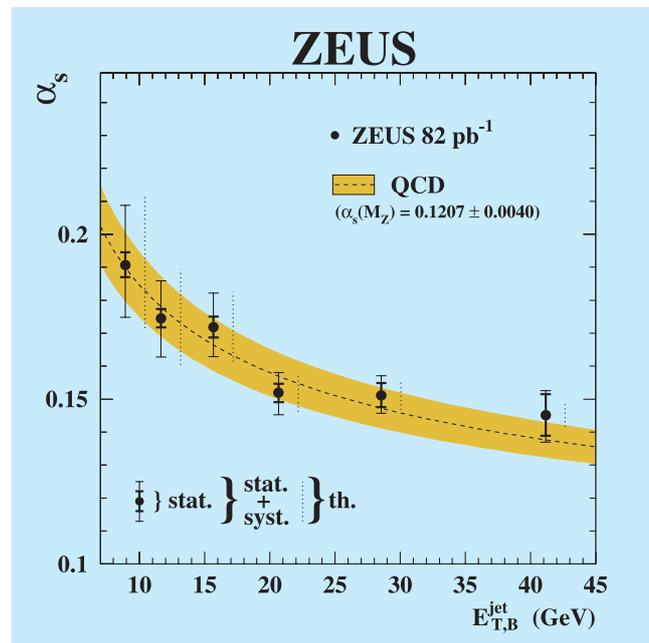


Abbildung 29: Werte für α_s als Funktion der transversalen Energie der Jets E_T^{jet} . Die Messungen (Punkte) werden mit einer QCD-Vorhersage (Kurve) verglichen. Die Unsicherheit in der theoretischen Vorhersage wird mit einem gelben Band verdeutlicht.

entwickelt. Für die Jet-Erzeugung bei HERA sind die störungstheoretischen Berechnungen in der führenden Ordnung (LO, *leading order*) und in der nächstführenden Ordnung (NLO, *next-to-leading order*) bekannt. Nur für sehr wenige Prozesse stehen auch schon die Berechnungen einer weiteren Ordnung (NNLO) zur Verfügung. Die Messungen, speziell bei HERA, ermöglichen einzigartige Einblicke in die QCD und führen direkt zu Weiterentwicklungen ihres theoretischen Verständnisses. Der HERA Speicherring wird deshalb auch gern als QCD-Maschine bezeichnet.

Die für die QCD relevanten Veröffentlichungen des letzten Jahres lassen sich in zwei Kategorien einordnen:

- Produktion von Teilchen, wie prompte Photonen, Teilchen mit Strange-Quarks und Teilchen mit Beauty-Quarks,
- Studien zur Ereignistopologie, wie der Ereignisform mit unterschiedlichen Messgrößen, von

möglichen azimuthalen Asymmetrien oder der Trennung von zwei produzierten Jets durch einen Bereich ohne Teilchenproduktion.

Die Ereignisse mit einem isolierten Photon, den sogenannten prompten Photonen, bieten ein exzellentes Werkzeug, um harte Streuprozesse bei HERA zu studieren. Vier Beispiele zur Erzeugung dieser prompten Photonen sind in Abbildung 30 dargestellt. Weil isolierte Photonen nach der Streuung keine Hadronisierung durchlaufen, kann man mit diesen Ereignissen die zugrundeliegenden Prozesse auf der Parton-Ebene studieren. Die Erzeugung prompter Photonen zusammen mit einem Jet, ist direkt abhängig von den Quark-Dichten im Proton (Abbildung 30 a) und b)). In der Wechselwirkung dieser beiden Darstellungen reagiert das Photon punktförmig. In den beiden Abbildung 30 c) und d) reagiert das Photon wie ein Hadron. Für diesen Fall können für das Photon, ebenso wie für das Proton, Parton-Dichten definiert und über diese Reaktionen gemessen werden. Durch Vergleiche mit theoretischen

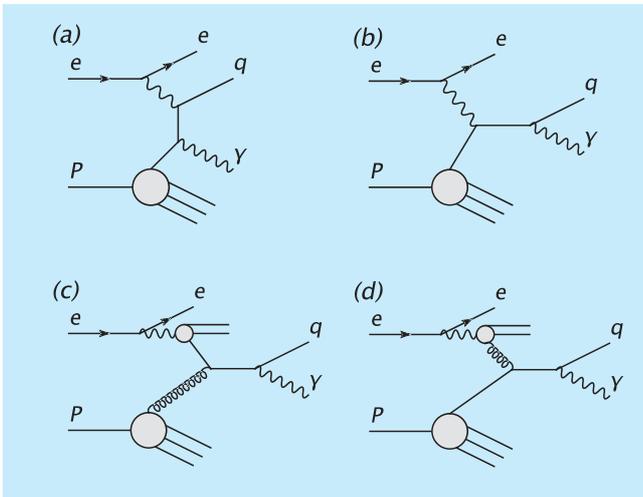


Abbildung 30: Feynman-Diagramme von vier Prozessen in $e p$ Streuungen, die zur Produktion eines prompten Photons und eines Jets führen. Das Elektron und das Proton laufen von links ein. Das Elektron strahlt ein Photon ab, das mit dem Proton entweder punktförmig in (a) und (b) oder hadronisch in (c) und (d) wechselwirkt. Das erzeugte prompte Photon (γ) und der Jet aus dem hadronisierten Quark (q) verlassen nach rechts die Wechselwirkungszone.

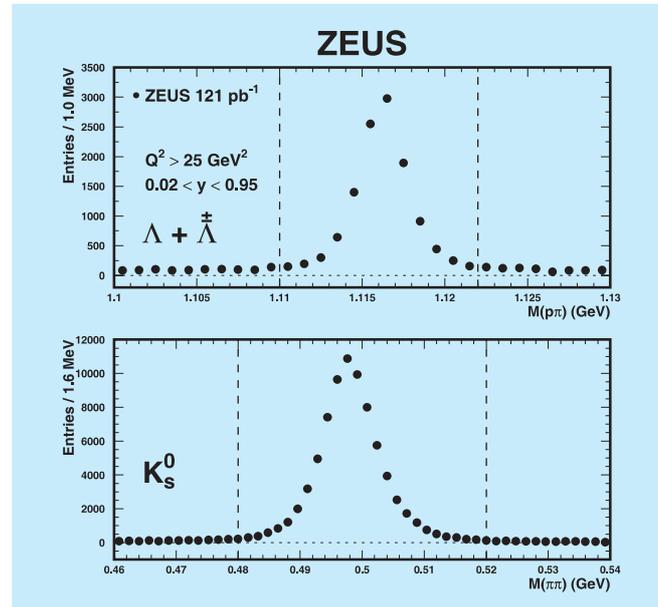


Abbildung 31: Verteilungen der Masse von rekonstruierten Teilchenkandidaten im Datensatz für $\Lambda + \bar{\Lambda}$ und K_s^0 Erzeugung. Insgesamt befinden sich nach der Subtraktion des Untergrundes rund 10730, bzw. 73140, Teilchenkandidaten im Bereich zwischen den beiden Markierungslinien.

Berechnungen werden auch diese Parton-Dichten im Photon überprüfbar. In der Analyse zeigte sich, dass Simulationen in führender Ordnung die gemessenen Wirkungsquerschnitte unterschätzen. Mit der nächsten Ordnung in den Berechnungen werden diese Diskrepanzen reduziert, es bleibt allerdings bei einer Unterschätzung der Vorhersagen im Bereich von kleinen transversalen Energien für das Photon und den Jet. Hier sind die Berechnungen sehr abhängig von der Einbeziehung noch höherer Ordnungen und der Behandlung der Hadronisierungseffekte für den Jet. Eine bessere Beschreibung der Daten konnte durch Berechnungen erzielt werden, in denen eine QCD Faktorisierung relativ zum intrinsischen transversalen Impuls der Partonen (k_t) realisiert wurde und nicht wie sonst üblich zum longitudinalen Impulsbruchteil x . Geht man in den Bereich von höheren transversalen Impulsen des Photons, stimmen alle Berechnungen gut mit den Daten überein.

Die Produktion von neutralen Hadronen, die eine spezielle Art von Quarks, die Strange-Quarks enthalten,

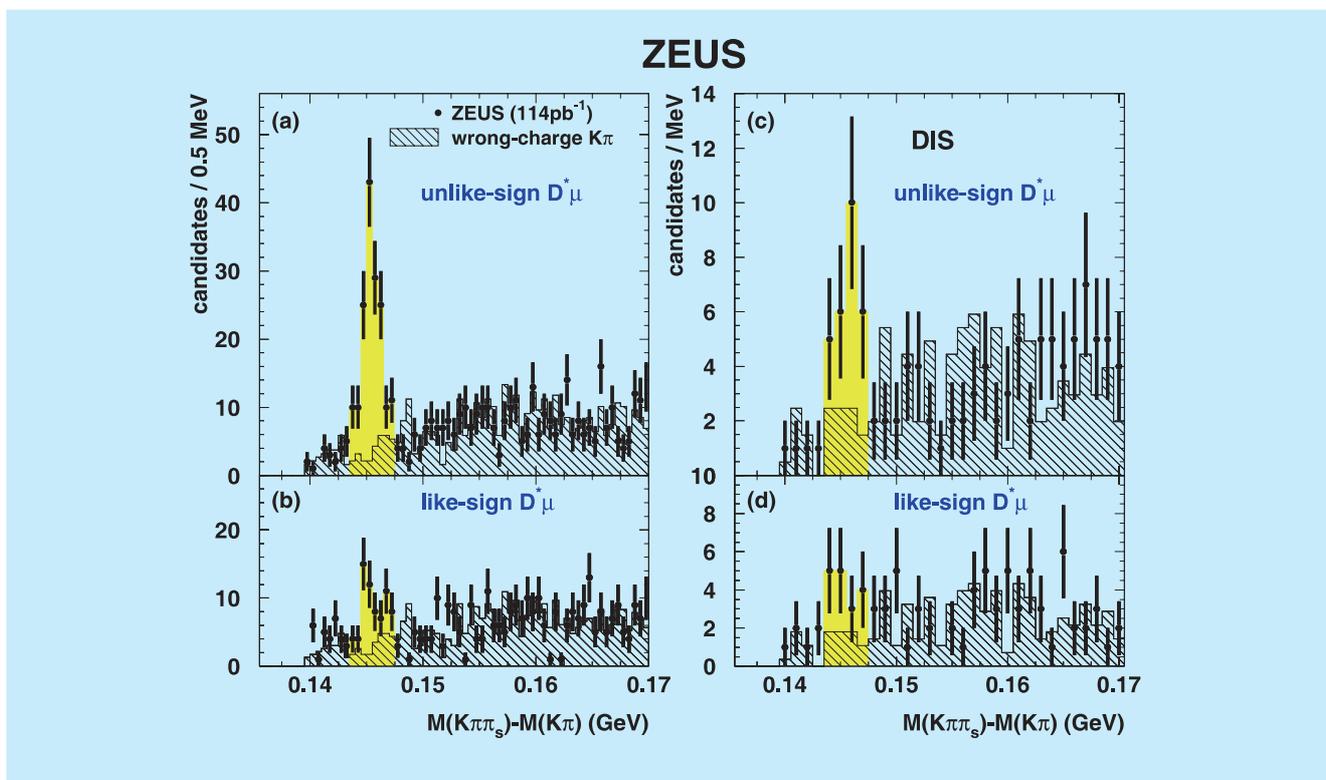


Abbildung 32: Verteilung der Massendifferenzen für $D^*\mu$ Kandidaten. In den Daten (Punkte) erhebt sich klar das Signal (gelb markiert) über den kombinatorischen Untergrund (gestricheltes Histogramm).

gehört zum Messprogramm an allen Teilchenbeschleunigern, wie beispielsweise e^+e^- bei LEP, $\bar{p}p$ am Tevatron, pp bei RHIC, und wurde auch in ep bei HERA schon intensiv studiert. Die Daten wurden zu Tests der QCD Vorhersagen herangezogen und für Weiterentwicklungen von phänomenologischen Modellen verwendet. Letztere ermöglichen QCD Vorhersagen, die sich nicht nur aus den grundlegenden Prinzipien ableiten lassen. Die Ergebnisse gehen direkt in die Modelle ein, mit denen die Produktion von Hadronen bei hohen Energien beschrieben wird. Abbildung 31 zeigt das Signal für die untersuchten Hadronen, Λ und $\bar{\Lambda}$, sowie K_s^0 . Im Allgemeinen sieht man eine gute Übereinstimmung der Modelle mit den Daten. Die Messungen bei HERA decken sich mit den Ergebnissen aus e^+e^- Kollisionen bei LEP.

Die Erzeugung von sogenannten Beauty-Quarks erlaubt stringente Tests für störungstheoretische QCD-Berechnungen.

Weil die Masse der Beauty-Quarks in etwa $5 \text{ GeV}/c^2$ beträgt und der Prozess somit intrinsisch über eine Skala verfügt, die hoch genug ist, geht man davon aus, dass die Vorhersagen schon in der nächst führenden Ordnung verlässlich sind. In der publizierten Analyse wurde konkret die Reaktion

$$ep \rightarrow e\bar{b}X \rightarrow eD^*\mu X'$$

studiert. Diese Reaktion liefert einen mit Beauty-Quarks angereicherten Datensatz, für den gleichzeitig der Untergrund anderer Prozesse stark unterdrückt ist. Damit ist es möglich, sehr niedrige Transversal-Impulse p_T zu selektieren und so nah wie nie zuvor an die Produktionsschwelle heranzureichen. Abbildung 32 zeigt, wie das Signal für das durch die Reaktion produzierte $D^*\mu$ in der Massenverteilung aller Ereigniskandidaten heraustritt, wenn die richtigen Ladungskombinationen gebildet werden. In der Abbildung sind die Datensätze

für sehr kleine Werte von Q^2 nahe Null und für höhere Werte getrennt dargestellt. Die gemessenen Wirkungsquerschnitte sind größer als die Berechnungen in nächst-höherer Ordnung vorhersagen. Allerdings liegen die Abweichungen innerhalb der Unsicherheiten der Messung und der Berechnungen.

In der zweiten Kategorie der QCD Studien wird die generelle Form der Ereignisse, die Verteilung der produzierten Teilchen, analysiert. In der als nächstes beschriebenen Publikation werden sechs verschiedene Messgrößen für die Ereignistopologie untersucht. Sie sind innerhalb der QCD berechenbar, teilweise sind die Vorhersagen in der nächst-höheren Ordnung schon bekannt. Diese Präzisionstests für die QCD Vorhersagen erfordern ein gutes Verständnis aller Effekte, auch derjenigen, die nicht störungstheoretisch berechenbar sind, wie beispielsweise der Prozess der Hadronisierung. Der Einfluss dieser nicht-störungstheoretischen Korrekturen ist umgekehrt proportional zu einer Potenz von Q^2 . Dabei wird zusätzlich zur starken Kopplung α_s eine effektive Kopplung α_0 für niedrige Energien definiert, die für alle Ereignisformen universal ist. Dieser Ansatz erlaubt es, sowohl α_s als auch α_0 durch Anpassungen der Modell-Abhängigkeiten an die Daten zu bestimmen. Die neue Veröffentlichung verbessert eine ähnliche, früher veröffentlichte Publikation mit weitaus höherer Statistik und durch die Hinzunahme von zwei weiteren Messgrößen. Mit der höheren Statistik ist es möglich, den Datensatz in verschiedene Untergruppen zu teilen, hierdurch werden die Tests zur Gültigkeit der angewandten Modellannahmen immer exakter.

Abbildung 33 stellt die sechs Messgrößen für zwei verschiedene Bereiche in Q^2 in Abhängigkeit von α_s und α_0 dar. Unter den sechs Messgrößen befindet sich beispielsweise der *Thrust* (T), der angibt wie stark das erzeugte hadronische System longitudinal ausgerichtet ist, während B, das *jet broadening* die Ausbreitung in transversaler Richtung beschreibt. Auch die invariante Jet Masse, M^2 , wird ausgewertet. In den beiden Darstellungen ist sichtbar, dass nicht alle Messgrößen die gleichen Werte für α_s und α_0 bevorzugen, auch nicht innerhalb der Unsicherheiten der einzelnen Messungen. Dies deutet auf Probleme in der theoretischen Beschreibung hin. Obwohl die angewandten nicht-störungstheo-

retischen Korrekturen die anderen studierten Abhängigkeiten generell gut beschreiben, wird hier klar, dass die Prozesse, die in den höheren Ordnungen berechnet werden müssen und die in diesen Berechnungen noch nicht eingeschlossen sind, einen großen Einfluss haben.

Eine ähnliche Schlussfolgerung lässt sich aus einer weiteren Studie der Ereignisform ableiten. In ihr wurde der Energie-Fluss in den erzeugten hadronischen Endzuständen gemessen, um Rückschlüsse auf etwaige azimuthale Asymmetrien zu ziehen. Es zeigte sich, dass die Berechnungen in der nächst-höheren Ordnung die gemessenen Momente der azimuthalen Asymmetrie besser beschreiben als die etwas niedrigere Ordnung. Aber auch hier sind Defizite sichtbar, die darauf hinweisen, dass Berechnungen in der noch höheren Ordnung erforderlich sind, um eine zufriedenstellende Beschreibung der Daten zu ermöglichen.

Eine ganz besondere Ereignistopologie wurde in den Datensätzen mit zwei Jets untersucht. In diesen Datensätzen tauchen Ereignisse auf, in denen die Jets durch eine Rapiditätslücke, einem Bereich ohne Teilchen-Aktivität, getrennt sind. In den gewöhnlichen Wechselwirkungen der starken Kraft ist dies nur durch äußerst seltene statistische Fluktuationen möglich, die exponentiell mit wachsendem Abstand der Jets unterdrückt sind. Erklärungsansätze gehen unter anderem von einem gleichzeitigen Austausch zweier Gluonen aus. Dieser Zustand hat dann die Quantenzahlen des Vakuums, kann aber trotzdem stark wechselwirken. Nur Simulationen, die zusätzlich zu den üblichen Wechselwirkungen auch ein Modell eines solchen Zustandes enthalten, können die Daten beschreiben. Diese Art von Wechselwirkungen mit einem Zustand mit Vakuum-Quantenzahlen erscheint auch in anderen Streuprozessen, beispielsweise mit einer Rapiditätslücke in der Proton-Richtung. Wie bei der Messung der Struktur des Protons kann man auch in diesen speziellen, nach einem Analogon in der Optik auch diffraktiv genannten, Ereignissen versuchen, die diffraktive Struktur des Protons zu messen. In diesen Analysen gab es im vergangenen Jahr große Fortschritte, beispielsweise konnten erstmalig innerhalb eines Experimentes die drei möglichen Selektionsmethoden für diese speziellen Ereignisse gleichzeitig angewandt werden. Dadurch war es

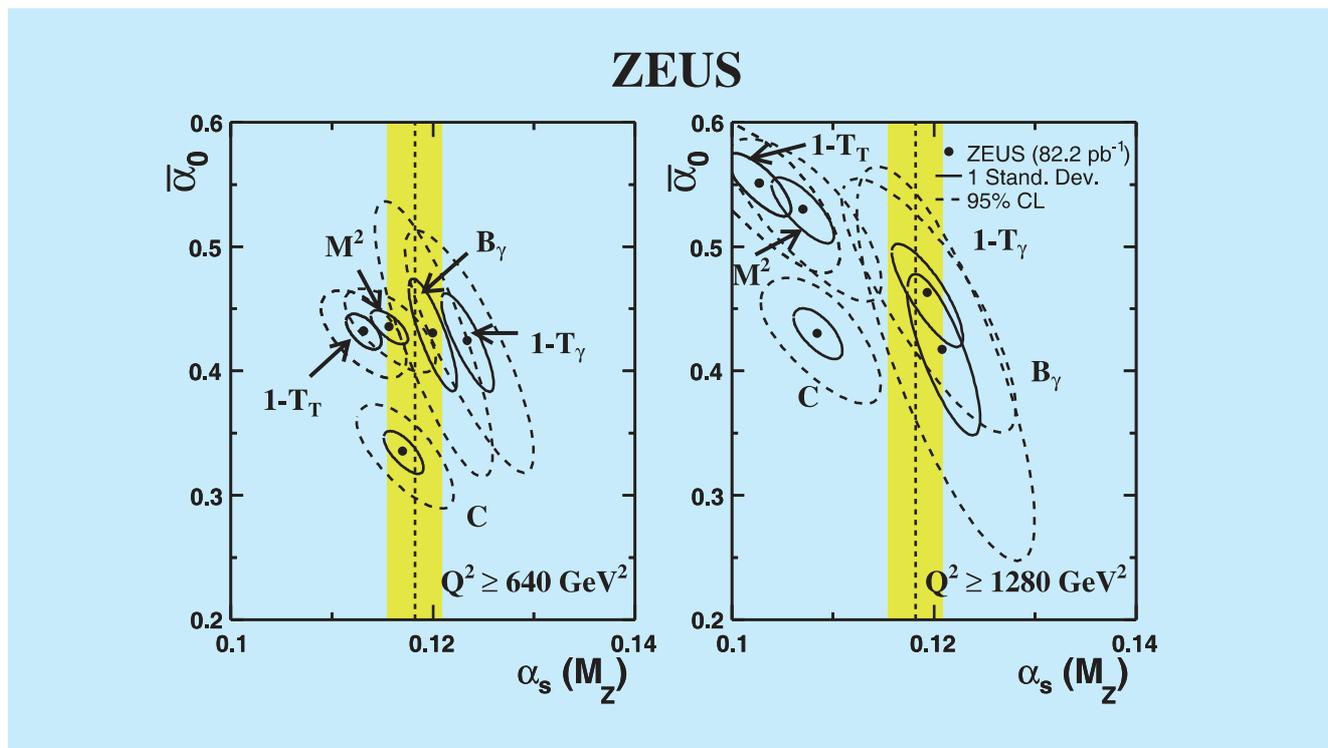


Abbildung 33: Werte für α_s und α_0 , extrahiert aus Anpassungen an die Verteilungen der verschiedenen Messgrößen zur Form der selektierten Ereignisse.

möglich, Diskrepanzen, die in den vergangenen Jahren immer wieder auftraten, zu verstehen und aufzulösen. Die Ergebnisse mit den einzelnen Selektionsmethoden stimmen im Allgemeinen gut überein und das Verständnis von noch vorhandenen, kleineren Abweichungen schreitet zügig voran.

Suche nach exotischen Teilchen

Das Standardmodell beinhaltet in seiner derzeitigen Form drei der vier bekannten Kräfte. Zur Vereinheitlichung aller vier Kräfte gibt es verschiedene theoretische Ansätze. Viele von ihnen erfordern eine neue fundamentale Symmetrie (Super-Symmetrie, SUSY) zwischen den Fermionen (Teilchen mit halbzahligen Spin, z.B. Elektronen) und den Bosonen (Teilchen mit ganzzahligen Spin, z.B. Photon, Gluon). Zur Erfüllung dieser neuen Symmetrie müssen neue Teilchen existieren, welche die SUSY-Partner der Teilchen

im Standardmodell darstellen. Bei ihnen ist dann der Spin um jeweils $1/2$ geändert. Die Suche nach diesen super-symmetrischen Teilchen stellt einen weiteren sehr intensiv verfolgten Analysebereich an allen Beschleunigern der Welt dar. Bisher wurden allerdings noch keine Anzeichen für diese exotischen Teilchen gefunden.

Eine Veröffentlichung im Berichtszeitraum befasste sich mit der Suche nach einem dieser exotischen Teilchen, dem Top-Squark. Dieses Teilchen ist der super-symmetrische Partner zum Top-Quark im Standardmodell und ist der leichteste Zustand für Quarks in SUSY. Bei HERA kann das Top-Squark durch ein Positron und ein Down-Quark erzeugt werden und sein Zerfall kann in einem hoch-energetischen Positron oder Neutrino und hadronischen Jets enden. Dies ist eine sehr klare Signatur, nach der im gesamten zur Verfügung stehenden Datensatz gesucht werden kann. Diese deutliche Signatur hilft auch den Untergrund effizient zu separieren.

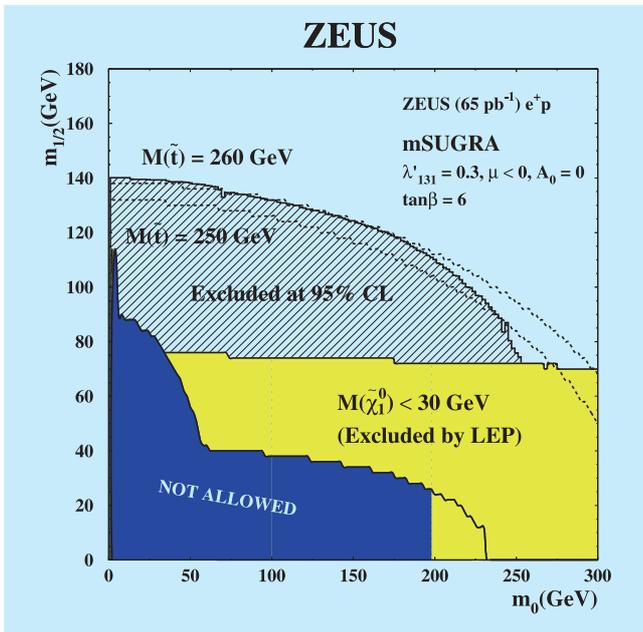


Abbildung 34: Darstellung des für Top-Squark-Produktion zugänglichen Bereiches in m_0 und $m_{1/2}$. Mit dem schraffierten Bereich wird die Existenz von Top-Squarks mit Massen bis zu $260 \text{ GeV}/c^2$ (obere gestrichelte Linie) ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Analyse können im Rahmen des minimalen Super-Gravitationsmodells (mSUGRA) interpretiert werden. Im mSUGRA Modell wird angenommen, dass zwei der freien Parameter festgelegt werden können und zwar die Massenskalen, m_0 und $m_{1/2}$, die universell für alle s-Fermionen und Gauginos gelten sollen.

Abbildung 34 zeigt das Ergebnis der Analyse als Korrelation zwischen diesen beiden Massenskalen. Die Tatsache, dass kein Ereignis gefunden wurde, das mit einer Top-Squark-Produktion kompatibel ist, bedeutet, dass die Existenz von Top-Squarks bis nahezu einer Masse von $260 \text{ GeV}/c^2$ ausgeschlossen werden kann.

Ausblick

In der ersten beschriebenen ZEUS-Analyse in diesem Bericht wurde gezeigt, wie neue Analysetechniken zum weiteren Verständnis beitragen und weitere vorher nicht

durchführbare Analysen erlauben. In den meisten bisher gezeigten Analysen sind die Möglichkeiten der neu eingebauten Detektorkomponenten noch nicht voll ausgeschöpft und in diesem Ausblick wird demonstriert, welches Potenzial sich noch durch die neuen Detektorkomponenten, den Mikrovertex Detektor (MVD) und den Strawtube Tracker (STT), bieten.

Abbildung 35 zeigt in der linken Darstellung das Signal für D^\pm Teilchen, so wie sie in den HERAI Daten mit den Spurdetektoren dieser Datennahmezeit selektiert werden konnten. Die obere Darstellung vermittelt einen Eindruck, wie das Signal in den HERA II Daten aussähe, wenn ähnliche Selektionskriterien angewandt würden. Es entspricht in etwa dem Signal aus den HERA I Daten, allerdings kann man aufgrund der besseren Statistik in den HERA II Daten schon eine Verbesserung in den statistischen Unsicherheiten erreichen. Dies wird durch die Zahlen in Tabelle 3 verdeutlicht.

Die absolute Anzahl der Ereignisse ist nicht in allen Fällen gleich, weil unterschiedliche Schnitte zur Selektion angewendet wurden und die Datensätze unterschiedlich groß sind. Bei der Ausnutzung der Möglichkeiten mit dem MVD, mit dem die Spuren der erzeugten Teilchen ganz nah am Erzeugungspunkt präzise vermessen werden können, verbessert sich die Nachweisgenauigkeit signifikant. In Tabelle 3 sieht man in dem Übergang von HERA I zu HERA II alt und neu eine Verbesserung in der relativen Genauigkeit der Ereignisanzahl von 10% auf 8% und durch die Analyse des MVD's auf 4%. Auch in der Genauigkeit der Breite des Signals werden große Fortschritte erreicht: sie wird von 1.3 MeV über 0.8 MeV auf 0.5 MeV um fast einen Faktor drei verbessert.

	HERA I	HERA II alt	HERA II neu
Luminosität	80 pb ⁻¹	135 pb ⁻¹	135 pb ⁻¹
Q ²	> 2	> 5	> 5
Ereignisse	4790 ± 10%	4419 ± 8%	2181 ± 4%
Breite [MeV]	11.5 ± 1.3	10 ± 0.8	11 ± 0.5
Masse [MeV]	1866 ± 1	1864 ± 2	1865 ± 1

Tabelle 3: Verfügbare Statistik und Ergebnisse zum Nachweis von D^\pm Teilchen.

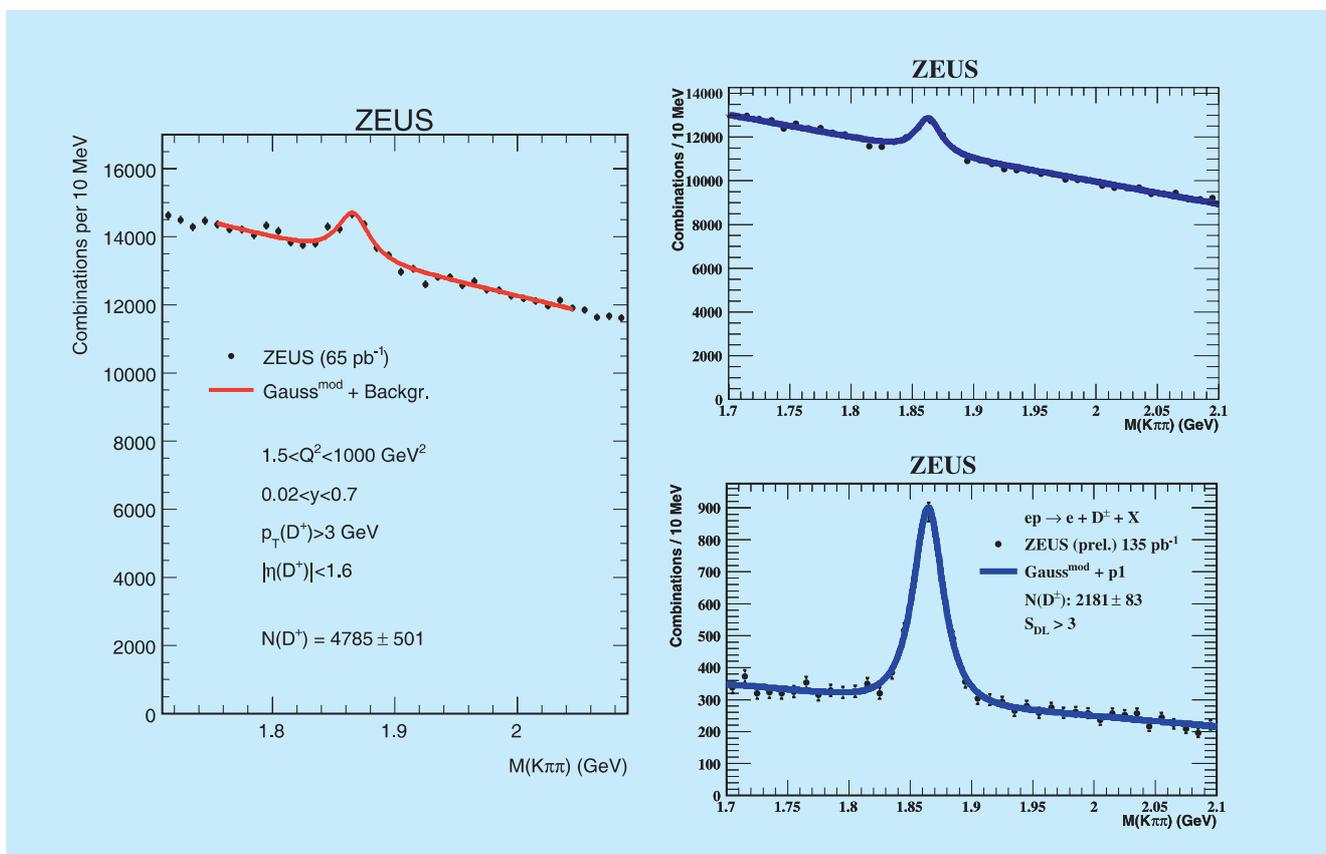


Abbildung 35: Verteilung der Massen für D^\pm Kandidaten in den HERA I Daten (links) und in den HERA II Daten (rechts). In den HERA II Daten ist einmal eine Selektion ähnlich wie in den HERA I Daten angewandt worden (oben) und einmal die Selektion unter Einsatz des MVDs verbessert worden (unten).

Dieses ausgewählte Beispiel vermittelt einen Eindruck von den Verbesserungen und den neuen Möglichkeiten, die sich mit der hohen Statistik der HERA II Daten und den neuen Detektorkomponenten ergeben. Viele

neue Analysen sind schon im Endspurt zur Veröffentlichung und die neuen Daten mit verminderter Protonen-Energie stellen viele weitere höchst interessante und bedeutende Ergebnisse in Aussicht.

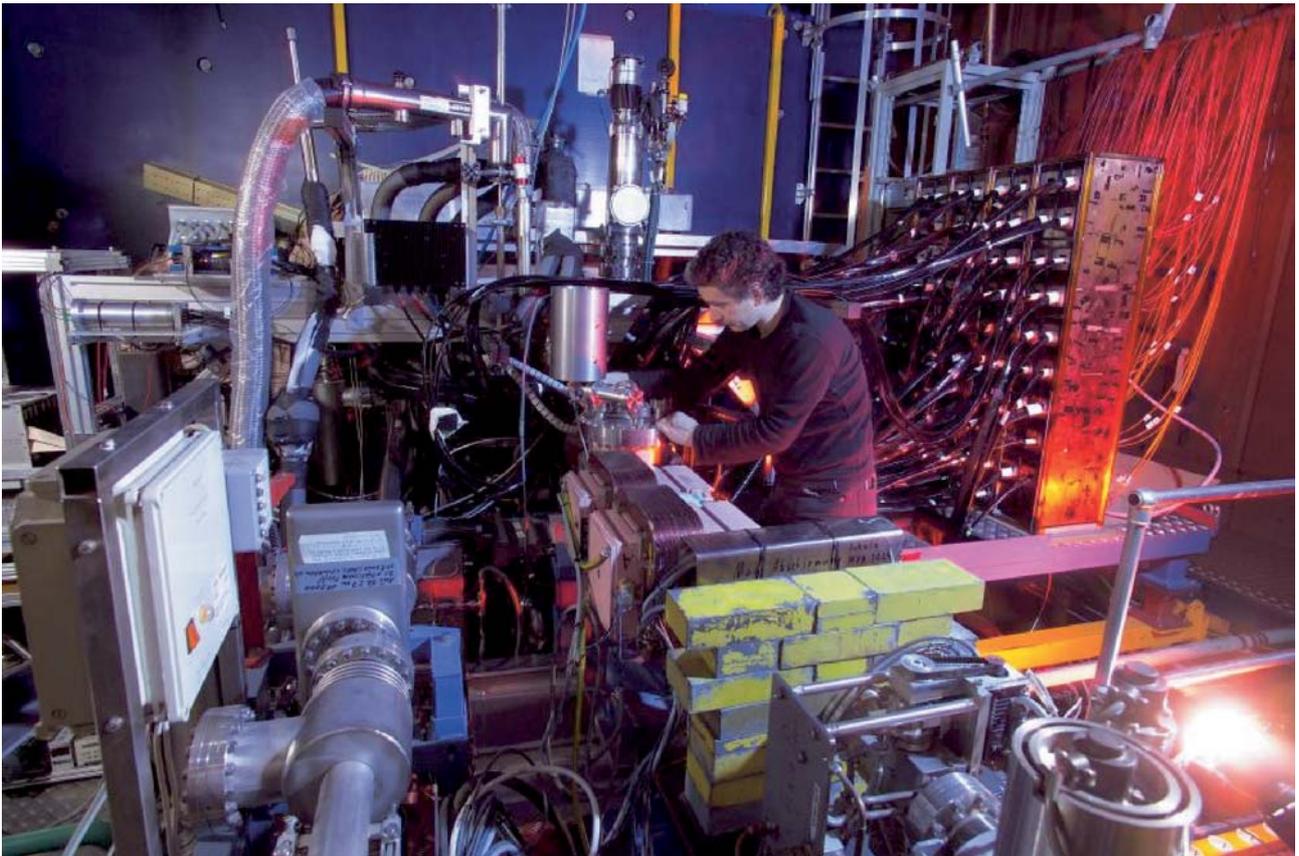


Abbildung 36: Das HERMES Experiment nach dem Einbau des Rückstoßdetektors (versteckt unter Zuleitungen in der Mitte des Bildes). Im Hintergrund ist der blaue Spektrometer-Dipolmagnet zu erkennen. Ganz vorne im Bild sieht man das Strahlrohr in dem die Positronen (oder Elektronen) des HERA-Beschleunigers sich mit einem Impuls von $27.5 \text{ GeV}/c$ auf das HERMES Gas-Target zubewegen, welches sich innerhalb des Rückstoßdetektors und Solenoid-Magneten befindet.

HERMES-Experiment

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

Sprecher: E.C. Aschenauer, DESY

Mit Beginn der Datennahme für das Jahr 2006 hat HERMES einen Rückstoßdetektor in Betrieb genommen, welcher die Akzeptanz des Experiments für den bisher fehlenden Nachweis des Rückstoßprotons aus exklusiven Streuereignissen erweitert. Für die Kollaboration bedeutet dies einen großen Schritt. Die Installation und Inbetriebnahme des Rückstoßdetektors erforderte den Abschied vom bisherigen Herzstück des HERMES Experiments, dem polarisierten Target, welches die Datennahme in den ersten zehn Jahren dominierte und zu einer Reihe einzigartiger Ergebnisse führte, die das bisher umfassendste Bild einer Beschreibung der Spinstruktur des Nukleons ergeben. Der potentielle Erkenntnisgewinn aus der Messung exklusiver Streuereignisse und die deutlich verbesserten Analysemöglichkeiten durch den zusätzlichen Nachweis der langsamen Rückstoßprotonen, sowie die Möglichkeit höherer Datenraten durch höhere Teilchendichten im Target rechtfertigen diesen Schritt.

Derzeit werden die Kalibration des Rückstoßdetektors abgeschlossen und erste Teilchenspuren aus dem im Jahre 2006 aufgezeichneten Datensatz für die Analyse bereitgestellt.

Der Schwerpunkt der Datenanalyse lag in der Fortführung der Untersuchungen der mit dem transversal polarisierten Wasserstofftarget aufgezeich-

neten Daten. Wie in vorangegangenen Beiträgen vorgestellt, werden hierbei azimuthale Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien für Mesonen oder Photonen extrahiert. Die Analyse dieser Asymmetrien für die Produktion reeller Photonen im exklusiven Streuprozess (Tiefinelastische Virtuelle Compton Streuung) erlaubte erstmalig eine Abschätzung des Gesamtdrehimpulses der Quarks im Nukleon. Dieses neue Ergebnis öffnet einen Weg zur Bestimmung des Bahndrehimpulses der Quarks im Nukleon.

Weitere Untersuchungen der Tiefinelastischen virtuellen Compton Streuung wurden an Daten von unpolarisierten schweren Kernen durchgeführt, welche Rückschlüsse auf die Modifizierung der Generalisierten Partonverteilungen im nuklearen Medium erlauben.

Aus den bei HERMES in den Run-I aufgenommenen polarisierten Wasserstoff- und Deuteriumdaten wurden weitere Ergebnisse extrahiert. So wurde unter Verwendung von Doppelspin-Asymmetrien, gemessen für inklusive erzeugte Hadronen, die Gluonpolarisation als Funktion des Transversalimpulses der Hadronen bestimmt.

Desweiteren wurde unter Verwendung einer neuartigen Analysemethode die Polarisation der Strange-See-Quarks mit erheblich verbesserter Genauigkeit bestimmt.

Neue Detektorkomponenten

Der HERMES Rückstoßdetektor

Tiefinelastische Streuexperimente zeigen, dass Protonen und Neutronen aus fundamentalen Bausteinen – den sogenannten Quarks – aufgebaut sind. Quarks werden mittels der starken Wechselwirkung, durch den Austausch von Gluonen als Botenteilchen zusammengehalten. Tiefinelastische Streuexperimente zeigen auch, dass Quarks massearme Teilchen mit einem Eigendrehimpuls (dem sogenannten Spin) von $1/2$ und drittelzahligen Ladungen (entweder $+2/3$ oder $-1/3$) sind. Die Eigenschaften des Protons sollten sich also aus den Eigenschaften seiner Konstituenten, der Quarks ableiten lassen. In diesem Modell setzt sich z. B. die Gesamtladung $+1$ eines Protons aus der Summe der Ladungen der sogenannten Valenzquarks des Protons (2 u-Quarks, jedes mit der Ladung $+2/3$ und 1 d-Quark mit einer Ladung von $-1/3$) zusammen. Auch andere Eigenschaften des Protons wie etwa das magnetische Moment oder auch der Unterschied zwischen Proton und Neutron lassen sich relativ präzise in diesem einfachen Modell beschreiben.

Daher sollte auch die Beschreibung des Eigendrehimpulses des Protons (der Proton spin) sich einfach aus den einzelnen Beiträgen der Valenzquarks ergeben. Der Spin des Protons ergibt sich aus fundamentalen, unabhängigen Messungen zu $1/2$. Jedes Quark trägt einen Spin $1/2$. Richten sich zwei dieser Quarks parallel zum Spin des Nukleons aus, das dritte jedoch anti-parallel, scheint die Summe aufzugehen. Der gesamte Spin des Protons scheint also durch den Beitrag $\Delta\Sigma = 1$ der Valenzquarks getragen zu werden.

Messungen dieses Beitrages $\Delta\Sigma$ in polarisierter, tiefinelastischer Streuung – u. a. von HERMES – zeigen jedoch, dass maximal $1/3$ des Protonspins dem Beitrag der Quarks zugeschrieben werden kann. Diese Diskrepanz fand unter dem Namen *spin-puzzle* Eingang in die Literatur. HERMES ist eines der wichtigsten Experimente zur Klärung dieses Rätsels. Nachdem Präzisionsdaten der HERMES Kollaboration und anderer, ähnlicher Experimente an Forschungszentren weltweit, das

Rätsel etabliert haben, konzentrieren sich die Anstrengungen der Spin-Physiker nun darauf, die übrigen Bausteine des Puzzles zu vermessen.

Neben den Quarks können auch die Gluonen zum Gesamtspin des Nukleons beitragen. Die HERMES Kollaboration konnte bereits erste Messungen veröffentlichen. Zurzeit erscheinen auch Daten der COMPASS Kollaboration am CERN. Außerdem werden in näherer Zukunft Daten aus Experimenten an RHIC erwartet. Alle bisher zugänglichen Messungen deuten allerdings darauf hin, dass auch der Beitrag der Gluonen zum Nukleonspin klein ist. Ein wenig Vorsicht ist bei dieser Aussage angebracht, da die Messungen und ihre Interpretation sehr schwierig sind und die Präzision und der Umfang der Messungen noch einen großen Spielraum lassen.

Parallel zu diesen Anstrengungen wurde in den letzten Jahren erstmals ein theoretischer und experimenteller Zugang zu Bahndrehimpulsanteilen der Quarks innerhalb eines Nukleons identifiziert. Die vergleichsweise massearmen Quarks sind sehr stark innerhalb eines Nukleons gebunden. Sie führen schnelle Eigenbewegungen um ein gemeinsames Zentrum aus. Ein Teil dieser Bewegungen führt zu nicht-verschwindenden Bahndrehimpulsanteilen, die wiederum zum Gesamtspin des Nukleons beitragen können.

Die Vermessung des Bahndrehimpulses erfordert die Messung eines Abstandes vom Zentrum sowie des Impulses der Quarks senkrecht zu diesem Abstand. Daten, die in konventioneller tiefinelastischer Streuung gewonnen werden, sind nur auf den Impuls der Quarks sensitiv, Messungen der Ortskomponenten sind auf elastische Streueignisse beschränkt und lassen keine Messung der Impulsanteile zu.

Erst in den letzten Jahren wurde der theoretische Rahmen geschaffen, diese beiden Aspekte der Nukleonstruktur innerhalb sogenannter generalisierter Partonverteilungen (*Generalised Parton Distributions*, GPDs) zu erfassen. Verschiedene Kollaborationen weltweit konzentrieren nun ihre Anstrengungen darauf, Reaktionen zu vermessen, die die Extraktion dieser GPDs zulassen. Sind diese GPDs einmal hinreichend genau

bestimmt, lässt sich aus ihnen der Bahndrehimpuls der Quarks innerhalb eines Nukleons ableiten.

Der Zugang zu den GPDs ist über die Vermessung des vollständigen Endzustandes einer Reaktion in einer sogenannten exklusiven Messung möglich, in denen das gestreute Nukleon intakt bleibt. Exklusive Messungen erfordern also den Nachweis aller Reaktionsprodukte und deren kinematische Verteilungen. Der Schwerpunkt der Messung liegt daher in möglichst einfachen Endzuständen bestehend aus dem gestreuten Elektron, dem gestreuten Nukleon und einem weiteren Reaktionsprodukt. Kompliziertere Endzustände sind sowohl experimentell als insbesondere auch theoretisch schwer zugänglich. Die HERMES Kollaboration konzentriert ihre Studien exklusiver Reaktionen daher auf die tief-virtuelle Comptonstreuung (*Deeply Virtual Compton Scattering*, DVCS) sowie die exklusive Produktion von pseudo-skalaren oder Vektormesonen bei hinreichend großen Impulsüberträgen und Energien.

In den zurückliegenden Jahren konnten erste Daten zu diesen Reaktionen gemessen und publiziert werden, die zeigen, dass ein Zugang zu GPDs mit dem HERMES Experiment möglich ist. Insbesondere die Vermessung tief-virtueller Comptonstreuung profitiert sowohl vom polarisierten Leptonenstrahl in HERA als auch von der Möglichkeit, diese Reaktionen in Elektron- und Positronstreuung zu messen. HERMES liefert damit einen weltweit einzigartigen Datensatz, der den Fortschritt in diesem Feld entscheidend vorantreibt.

Die Messungen zeigen jedoch einen methodischen Nachteil. Die Eigenschaften des HERMES Spektrometers in den ersten zehn Jahren der Datennahme waren nicht auf den Nachweis exklusiver Streueignisse optimiert. Bei den vergleichsweise hohen Energien im HERMES Experiment reicht die erzielbare experimentelle Auflösung nicht aus, um durch reine Analysetechniken exklusive Reaktionen zu etablieren. Die Daten zeigen immer noch eine Beimischung nicht-exklusiver Streueignisse, deren genauer Beitrag modelabhängig bestimmt werden muss und somit zur experimentellen Unsicherheit beiträgt. Mit Beginn der Datennahme im Jahr 2006 hat HERMES einen zusätzlichen Detektor in Betrieb genommen, welcher die Akzeptanz des Ex-

periments in der für den bisher fehlenden Nachweis des Rückstoßnukleons aus exklusiven Streueignissen erweitert. Für die Kollaboration bedeutet dies einen großen Schritt. Die Installation und Inbetriebnahme des Rückstoßdetektors bedeutet den Abschied vom bisherigen Herzstück des HERMES Experiments, dem polarisierten Target, welches die Datennahme und physikalischen Ergebnisse in den ersten zehn Jahren dominierte und zu einer Reihe einzigartiger Ergebnisse führte. Der potentielle Erkenntnisgewinn aus der Messung exklusiver Streueignisse und die deutlich verbesserten Analysemöglichkeiten durch den zusätzlichen Nachweis der langsamen Rückstoßprotonen, dem Ausschluss zusätzlicher Reaktionsprodukten durch einen größeren Akzeptanzbereich und nicht zuletzt die Möglichkeit höher Datenraten durch höhere Teilchendichten im Target rechtfertigen diesen schwerwiegenden Entschluss.

Der HERMES Rückstoßdetektor wurde unter engen zeitlichen Rahmenbedingungen von verschiedenen an HERMES beteiligten Instituten, darunter die Universitäten Erlangen, Gent, Giessen und Glasgow sowie Gruppen des INFN Frascati und DESY Zeuthen und DESY Hamburg, verwirklicht. Der HERMES Detektor wurde auf den positiven Nachweis eines Rückstoßprotons aus der tief-virtuellen Comptonstreuung optimiert. Zusätzlich wird die Fähigkeit, Untergrundreaktionen durch den Nachweis von geladenen und ungeladenen Pionen zu identifizieren, verlangt. Um den geforderten Energie- und Winkelbereich abzudecken ist der HERMES Rückstoßdetektor aus drei unterschiedlichen Detektorsystemen zusammengesetzt, die im Folgenden beschrieben werden. Um diese einbauen und betreiben zu können, waren Veränderungen am Kollimatorsystem und dem Reaktionstarget notwendig.

Bestmögliche Daten erfordern den Nachweis von Rückstoßprotonen bis hinunter zur kinematisch erlaubten Reaktionsschwelle über einen großen Winkelbereich. Die Detektoren müssen zugleich Teilchenidentifikation, Impulsmessung und die Bestimmung des Entstehungsortes erlauben. Zu diesem Zweck wurde die Vakuumkammer um den HERMES Wechselwirkungspunkt erweitert um Raum für einen in diesem Vakuum operierenden Halbleiterstreifen-zähler (Silikondetektor) zu erlangen. Der Silikondetektor setzt sich aus zwei

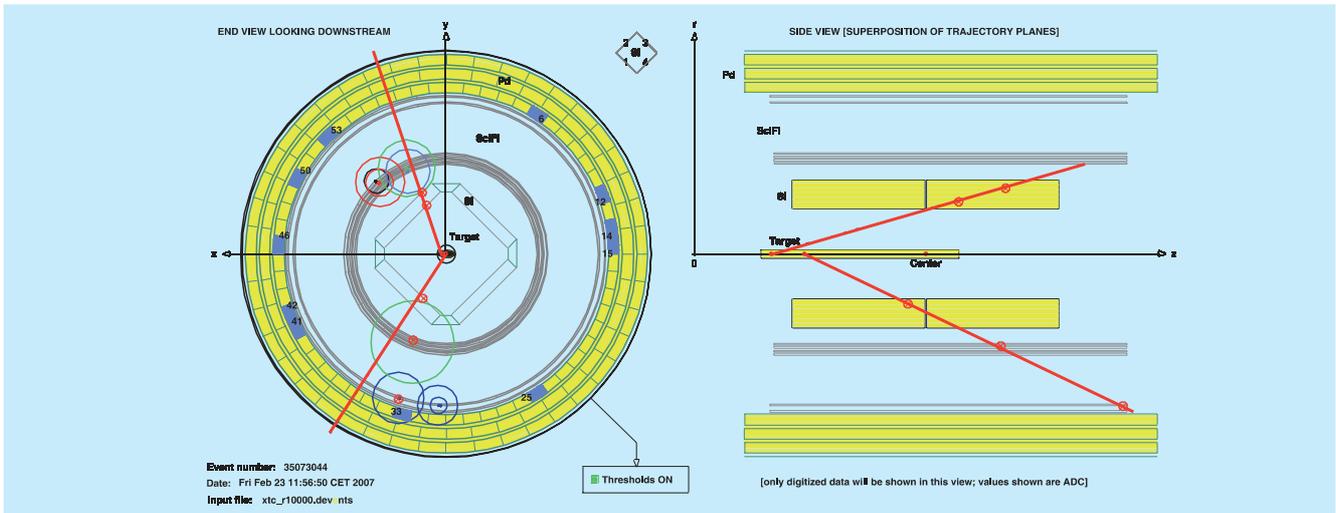


Abbildung 37: Darstellung der Spuren zweier Teilchenkandidaten in der Ereignisdarstellung des HERMES Rückstoßdetektors. Die roten Linien zeigen die rekonstruierte Anfangsrichtung der Teilchen an und gehen wegen der Krümmung im magnetischen Feld des Solenoiden nicht durch alle Punkte in der Sicht entlang des Strahls.

Doppelrhomben bestehend aus je 8 Detektormodulen zusammen. Jedes Detektormodul (vom Typ TIGRE) besitzt Streifen parallel und senkrecht zur Strahlachse, die unabhängig ausgelesen werden. Die Kombination von getroffenen Streifen innerhalb eines Moduls liefert einen Durchstoßpunkt. Die Kombination von solchen Punkten in hintereinanderliegenden Modulen ermöglicht die Rekonstruktion des Entstehungsortes innerhalb der Targetregion und den Winkel der Streuung. Zusätzlich wird für jeden getroffenen Streifen die erzeugte Ladungsmenge gespeichert. Diese wiederum ist abhängig von der Teilchensorte und dessen Energie, und erlaubt somit die Identifikation verschiedener Teilchenspezies. Niederenergetische Teilchen deponieren innerhalb des Detektors soviel Energie, dass sie dort stoppen. Für diese Teilchen misst der Silikondetektor die Gesamtenergie und erlaubt somit die Bestimmung des Teilchenimpulses. Dies ist auch für etwas schnellere Teilchen noch möglich, allerdings mit geringerer Genauigkeit.

Die Impulsbestimmung schnellerer Teilchen erfordert einen weiteren Detektor, der außerhalb des Vakuums installiert ist. Der Impuls eines Teilchens kann auf der

Krümmung seiner Bahn in einem Magnetfeld berechnet werden. Dazu wird folgendes verwendet: Ein 1.6 T starkes, sehr homogenes Magnetfeld entlang der Strahlachse wird von einem supraleitenden Solenoid-Magneten, der alle Detektoren umschließt, produziert. Die Durchstoßpunkte zur Rekonstruktion der Teilchenbahn im Magnetfeldes werden von den einzelnen Detektoren übernommen. Für diese Aufgabe ist im HERMES Rückstoßdetektor ein Spurdetektor aus szintillierenden Fasern (Scintillatordetektor) integriert. Dieser Detektor besteht aus zwei konzentrischen Doppelzylindern aus je zwei parallelen Lagen szintillierender Fasern sowie zwei um ± 10 Grad zur Strahlachse versetzten Lagen. Die Kombination getroffener Fasern aus den parallelen und Stereolagen innerhalb eines Zylinders liefern einen Durchstoßpunkt, die Kombination zweier Zylinder mit den Messungen des Silikondetektors insgesamt vier Punkte, die zur Berechnung des Bahnradius verwendet werden können. Ebenso wie beim Silikondetektor wird auch im Scintillatordetektor eine zur deponierten Energiemenge und somit ein für die Teilchensorte charakteristisches Energiesignal registriert und ausgewertet. Ein Beispiel mit dem Rückstoßdetektor gemessener Teilchenspuren ist in Abbildung 37 gezeigt.

Zum Nachweis von Photonen und zur Verbesserung der Teilchenidentifikation wurde um den Scintillatordetektor herum ein Photonendetektor (PD) konstruiert. Dieser Detektor besteht aus 3 unterschiedlich dicken Lagen Wolfram, um Photonen in geladene Teilchen zu konvertieren, zwischen denen sich herkömmliche, segmentierte Szintillationszähler befinden. Diese dienen dem Nachweis geladener Teilchen, entweder aus konvertierten Photonen oder primär geladener Teilchen hinreichend hohen Impulses. Die Messung der deponierten Energie erlaubt auch hier die Identifikation geladener Teilchen; die Segmentierung eine grobe Ortsbestimmung.

Das gesamte Detektorsystem wurde bis kurz vor dem Einbau Ende 2005 vollständig mit Hilfe kosmischer Höhenstrahlung getestet, um die verbleibende Datennahmezeit so effektiv wie möglich zu nutzen und die Integration in das bestehende HERMES Spektrometer und dessen Analyse zu vereinfachen. Diese Zeit

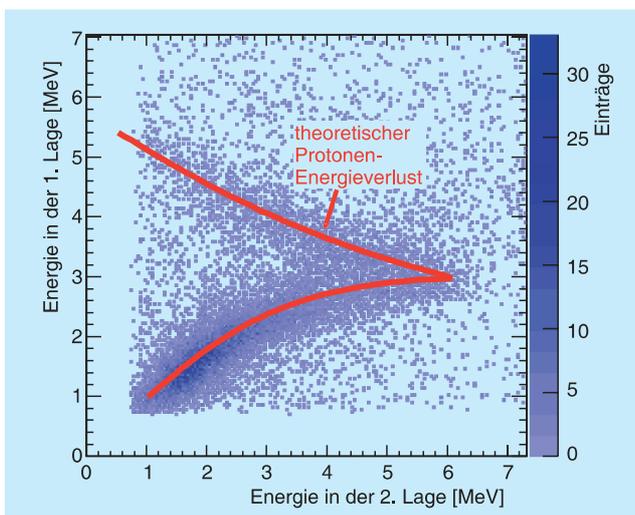


Abbildung 38: Deponierte Energie in der ersten und zweiten Lage des Silizium-Streifen-Zählers (Silikondetektors). Gezeigt sind experimentelle Daten nach einer vorläufigen Detektorkalibration. Schon hier zeichnet sich deutlich ein Band ab. Unterhalb von 3 MeV in der inneren Lage durchdringen alle Teilchen beide Detektoren, oberhalb hingegen werden Protonen in der zweiten Lage gestoppt, und bilden daher ein von links nach rechts abfallendes Band.

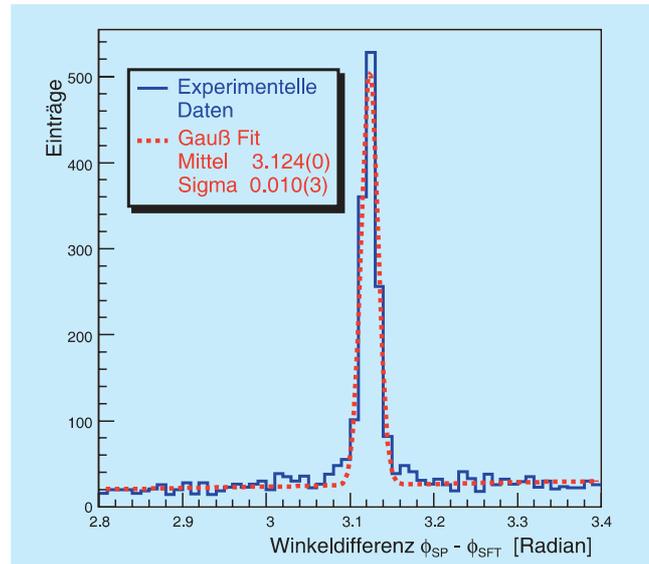


Abbildung 39: Winkeldifferenz der im Spektrometer gemessenen Leptonen ϕ_{SP} und im Scintillatordetektor des Rückstoßdetektors gemessenen Teilchen ϕ_{SFT} z. B. für die obere Detektorhälfte. Wie bei elastischer Streuung erwartet, werden die meisten Teilchen in entgegengesetzte Richtung emittiert. Wenn man zusätzlich noch – wie hier geschehen – elastische Ereignisse durch Selektion im Spektrometer auswählt, erhält man eine scharfe Verteilung um $180^\circ = \pi$.

wurde auch zum Testen der Einbauprozedur verwendet. Der Einbau verlief dementsprechend zügig und nach Plan. Auch anfängliche Schwierigkeiten und ein konzeptioneller Schwachpunkt im Design des neuen Targetsystems konnten schnell behoben werden. Die Datennahme mit dem HERMES Rückstoßdetektor läuft seit Frühjahr 2006.

Erste Teilchenspuren können aus dem Datensatz extrahiert werden (siehe Abbildung 37). Die HERMES-Physiker arbeiten nun mit Hochdruck daran, den Datensatz zu kalibrieren. Schon mit einer ersten aber noch zu verbessernden Energiekalibration des Silikondetektors zeigt sich ein klares Band für Protonen mit dem zu erwartenden Energieverlust (siehe Abbildung 38). Die geometrische Anordnung der 4822 Fasern des Scintillatordetektors wurde in einem Eichexperiment präzise vermessen und die Detektorteile mit rekonstruierten Spuren eingemessen. Bereits mit einer vorläufigen

Eichung wird die erwartete Winkelauflösung lediglich um 30% überschritten (siehe Abbildung 39). Da der Rückstoßdetektor noch nicht relativ zum Spektrometer geeicht ist, ergibt sich eine leichte Abweichung des Mittelwertes. In allen drei Lagen des Photonendetektors werden die erwarteten Signale gemessen. Abbildung 40 zeigt, dass diese tatsächlich realen Teilchendurchgängen entsprechen. Die gemessene Signalhöhe bildet eine Überhöhung aus, die umso deutlicher ausfällt, je stärker man mithilfe anderer Detektoren hauptsächlich elastisch gestreute Protonen auswählt.

Derzeit werden die Eichungen des Rückstoßdetektors abgeschlossen und Routinen, die die Datenqualität sicherstellen, implementiert. Erste, mithilfe der Informationen des Rückstoßdetektors gewonnene Ergebnisse sind für 2007 zu erwarten.

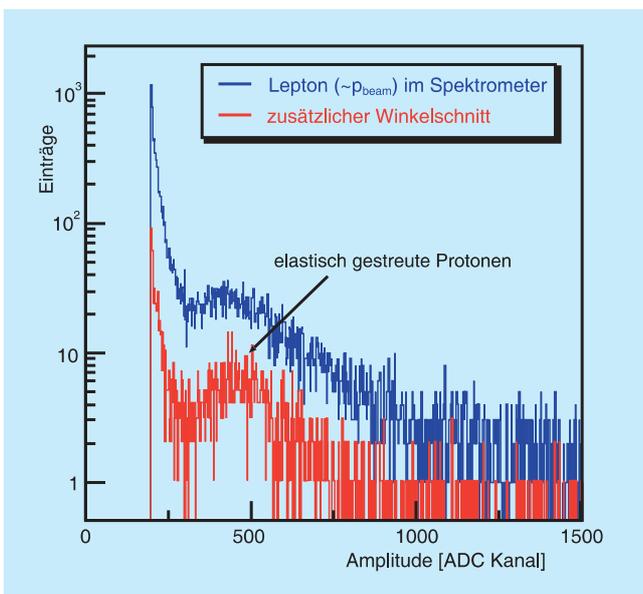


Abbildung 40: Amplitudenspektrum in der ersten Lage des Photonendetektors in logarithmischer Skala. Die obere blaue Kurve zeigt Ereignisse in denen ein schnelles Lepton im Spektrometer nachgewiesen wurde. Wenn man zusätzlich verlangt, dass diese in entgegengesetzter Richtung zu den im Photonendetektor gemessenen Teilchen vom Target emittiert wurden, erhält man die rote Verteilung. In beiden Fällen kann man die Erhöhung durch elastisch gestreute Protonen deutlich erkennen.

Physikalische Ergebnisse mit Polarisierten Targets

Exklusive Prozesse: Tiefinelastische virtuelle Compton-Streuung (DVCS)

Das besondere Interesse an einer Messung der Generalisierten Parton-Verteilungsfunktionen resultiert aus der erstmaligen Möglichkeit den Anteil des Bahndrehimpulses der Quarks am Spin des Nukleons zu bestimmen. X. Ji zeigte im Jahre 1997, dass die Generalisierten Parton-Verteilungsfunktionen E^q und H^q Informationen über den Gesamtdrehimpuls der Quarks J^q enthalten, welcher sich aus der Summe des Quarkspins und deren Bahndrehimpuls ergibt. Da der Beitrag der Quarkspins bereits mit guter Genauigkeit bekannt ist, ergibt sich folglich die Möglichkeit den Bahndrehimpuls der Quarks am Spin des Nukleons zu extrahieren.

Ähnlich wie im Fall der inklusiven und semi-inklusive tiefinelastischen Streuung, in der die Struktur des Nukleons durch die Parton-Verteilungsfunktionen beschrieben wird, können harte exklusive Prozesse mit Hilfe der Generalisierten Parton-Verteilungsfunktionen beschrieben werden. Diese ermöglichen erstmalig eine dreidimensionale Beschreibung des Nukleons, da sie sowohl von der transversalen Position als auch vom longitudinalen Impuls der Partonen innerhalb des Nukleons abhängen sowie deren Korrelation beschreiben. Die gewöhnlichen Partonen-Verteilungsfunktionen und elastischen nuklearen Formfaktoren sind als Grenzwerte bzw. Momente in den Generalisierten Parton-Verteilungsfunktionen enthalten. Ein Beispiel eines harten exklusiven Prozesses ist die tiefinelastische virtuelle Compton-Streuung (DVCS).

Der DVCS-Prozess beschreibt die Streuung eines Leptons durch den Austausch eines virtuellen Photons an einem Nukleon oder Atom, bei dem ein reelles Photon entsteht. Dieser Prozess interferiert mit dem Bethe-Heitler-Prozess, da beide experimentell ununterscheidbare Endzustände besitzen. Beim Bethe-Heitler-Prozess wird das reelle Photon vom einlaufenden oder gestreuten Lepton emittiert, während es beim DVCS-

Prozess von einem der Partonen stammt. Obwohl im typischen kinematischen Bereich von HERMES die Wahrscheinlichkeit für den DVCS-Prozess viel kleiner ist als die des Bethe-Heitler-Prozesses, kann man mit Hilfe des Interferenzterms Informationen über die DVCS-Amplitude erhalten.

Die Messung von azimuthalen Asymmetrien bezüglich unterschiedlicher Ladungen des Leptonbeams bzw. bezüglich der Polarisation des Strahls oder des Targets eröffnet einen experimentellen Zugang zur DVCS-Amplitude und damit zur Bestimmung der generalisierten Parton-Verteilungsfunktionen E^q und H^q . Eine erste Analyse der Asymmetrie bezüglich der Strahlladung, die insbesondere auf die Funktion H^q sensitiv ist, wurde bereits veröffentlicht. Diese Messung wird in den nächsten Jahren mit deutlich höherer Statistik verbessert werden.

Besonderes Interesse galt der Analyse der mit einem transversal polarisierten Wasserstofftarget aufgezeichneten Daten. Die Asymmetrie bezüglich der transversalen Targetpolarisation ist eine der seltenen Messgrößen die auf die Funktion E^q sensitiv sind. In diesem Jahr veröffentlichte HERMES erste Ergebnisse zur Messung der transversalen Targetspin-Asymmetrie sowie die erstmalige, modellabhängige Abschätzung des Gesamtdrehimpulses von Up- und Down-Quarks im Nukleon.

Transversale Targetspin-Asymmetrie

Die Asymmetrie bezüglich der transversalen Targetpolarisation ist definiert als

$$A_{UT}(\phi, \phi_s) = \frac{d\sigma(\phi, \phi_s) - d\sigma(\phi, \phi_s + \pi)}{d\sigma(\phi, \phi_s) + d\sigma(\phi, \phi_s + \pi)} \quad (1)$$

mit den differentiellen Wirkungsquerschnitten $d\sigma$ für die Produktion exklusiver Photonen, dem azimuthalen Winkel ϕ zwischen der Leptonenstreuebene und der Photonenproduktionsebene und ϕ_s , dem Winkel zwischen dem Polarisationsvektor des Targets und der Leptonenstreuebene.

HERMES nahm während der Jahre 2002 bis 2005 Daten an einem transversal polarisierten Wasserstoffgas-Target. Die Ergebnisse beinhalten die Messungen der

Jahre 2002 bis 2004 und ergeben eine Amplitude von

$$\langle A_{UT}^{\sin(\phi - \phi_s) \cos \phi} \rangle = -0.149 \pm 0.058(\text{stat.}) \pm 0.033(\text{syst.}) \quad (2)$$

Von theoretischer Seite wurde ein Modell entwickelt, in dem die generalisierte Quark-Verteilungsfunktion E^q in Abhängigkeit von den Gesamtdrehimpulsen der Up- und Down-Quarks J^u und J^d beschrieben werden kann. Es wurde nachgewiesen, dass in diesem Modell die Amplitude der transversalen Targetspin-Asymmetrie $A_{UT}^{\sin(\phi - \phi_s) \cos \phi}$ im Wesentlichen auf diese beiden Parameter sensitiv ist. Zur Abschätzung dieser Parameter wird die experimentell ermittelte Amplitude mit der – in Abhängigkeit von den Gesamtdrehimpulsen – berechneten Amplituden verglichen und eine Fehlerminimierung durchgeführt. Aus diesen Überlegungen erhält man das in Abbildung 41 gezeigte Band für mögliche Werte von J^u und J^d , das dem Bereich einer Standardabweichung entspricht. Die Analyse ergibt einen Wert von $J^u + J^d/0.29 = 0.42 \pm 0.21 \pm 0.06$, wobei zunächst der experimentelle Fehler und dann der aus den Modellannahmen resultierende Fehler angegeben ist. Aus Abbildung 41 ergibt sich beispielsweise für die Annahme $J^d = 0$ ein Wert von 0.4 für den Gesamtdrehimpuls der Up-Quarks im Nukleon.

Strahlhelizitätsasymmetrie in Abhängigkeit von der Massenzahl des Targets

Darüber hinaus veröffentlichte HERMES in diesem Jahr vorläufige Ergebnisse der Asymmetrie bezüglich der Strahlhelizität für Targets verschiedener Massenzahl. Diese Messungen erlauben Rückschlüsse auf die Modifizierung der generalisierten Parton-Verteilungsfunktionen im nuklearen Medium.

Im Falle eines nuklearen Targets unterscheidet man zwischen dem kohärenten Prozess, bei dem am ganzen Kern gestreut wird und dem inkohärenten Prozess, bei dem der Kernverbund aufgebrochen wird und das reelle Photon im Endzustand von einem bestimmten Nukleon emittiert wird.

Um den kohärenten vom inkohärenten Anteil der Ereignisse zu trennen, nutzt man die Abhängigkeit vom

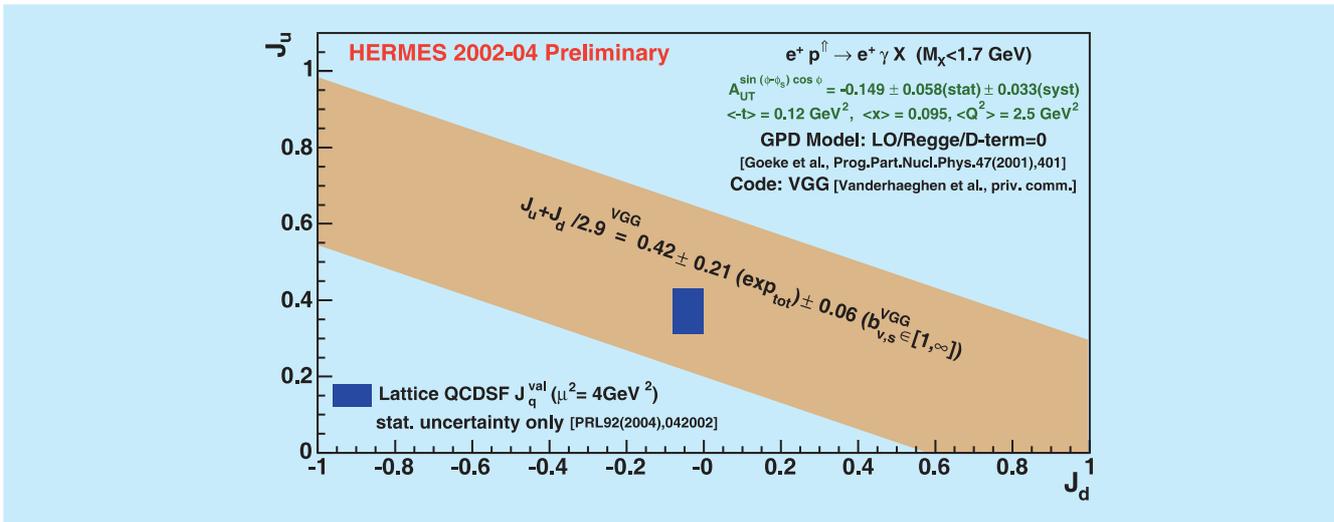


Abbildung 41: Modellabhängige Einschränkung der Gesamtdrehimpulse von Up- und Down-Quarks (J^u und J^d). Das blaue Rechteck zeigt das Ergebnis einer theoretischen Berechnung, die ausschließlich die Valenzquarks betrachtet.

Impulsübertrag t auf das Target. Hohe Werte von t entsprechen einer hohen Wahrscheinlichkeit für das Aufbrechen des Kernverbundes und damit dem inkohärenten Prozess. Zur besseren Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Targets wurden die Bedingungen so gewählt, dass die kohärenten Daten einem mittleren t von 0.018 GeV^2 und die inkohärenten Daten einem mittleren t von 0.2 GeV^2 entsprechen.

Die extrahierten Verhältnisse der Strahlhelizitätsasymmetrie A_{LU} von verschiedenen nuklearen Targets (Deuterium, Stickstoff, Neon, Krypton und Xenon) relativ zur Asymmetrie am Wasserstofftarget sind in Abbildung 42 zu sehen. Die mittlere Strahlhelizitätsasymmetrie der nuklearen Targets übertrifft in der kohärenten Region die von Wasserstoff um zwei Standardabweichungen (oberer Graph). Dagegen sind die Verhältnisse in der inkohärenten Region (unterer Graph) konsistent mit 1. Beide Resultate befinden sich in guter Übereinstimmung mit theoretischen Vorhersagen.

Bestimmung der Gluonpolarisation

Wie eingangs dargelegt, besteht ein wesentliches ungelöstes Problem der heutigen Hadronphysik darin,

dass die Zusammensetzung des Nukleon-Gesamtdrehimpulses aus denjenigen seiner partonischen Bestandteile bisher nur zu einem kleinem Teil bekannt ist. Mit Hilfe von Messergebnissen des HERMES-Experiments wurden bereits Antworten erhalten zum Eigendrehimpuls (Spin) von Valenz- und Seequarks, sowie kürzlich zum Gesamt(Spin+Bahn-)drehimpuls von u- und d-Quarks. Obwohl die Gluonen insgesamt etwa die Hälfte des Nukleonimpulses tragen, gibt es bisher noch keine genaueren Antworten zu ihrem Anteil ΔG am Spin $\frac{1}{2}$ des Nukleons. Aus Analysen der inklusiven Streuung im Rahmen einer sogenannten QCD-Analyse (in welchen aus der gemessenen kinematischen Abhängigkeit des polarisierten Lepton-Nukleon Wirkungsquerschnitts Parton-Verteilungsfunktionen extrahiert werden) können bisher nur indirekte, und daher relativ ungenaue Aussagen zur polarisierten Gluon-Verteilungsfunktion $\Delta g(x)$ sowie zu deren Integral $\Delta G = \int_0^1 dx \Delta g(x)$ erhalten werden. Mit x wird hier der vom Gluon getragene Bruchteil des Nukleonimpulses bezeichnet. Die direkte Messung ist schwierig und derzeit an vielen großen Beschleunigerzentren (RICH in Brookhaven, CERN in Genf, HERA in Hamburg) Gegenstand intensiver Forschung. Experimentell zugänglich ist in diesen Messungen das Verhältnis

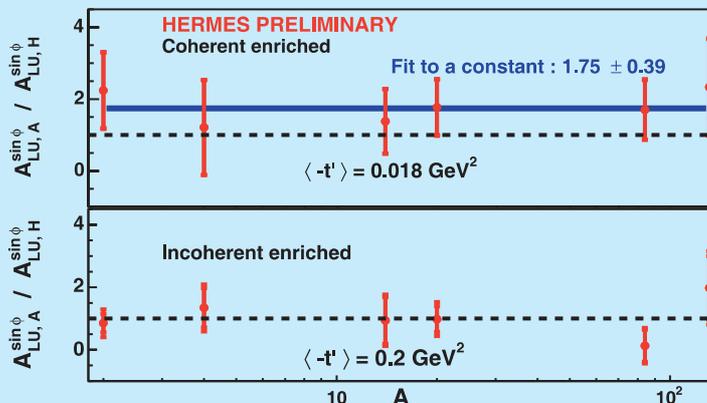


Abbildung 42: Das Verhältnis der Strahlhelizitätsasymmetrie für Targets verschiedener Massenzahl A relativ zur Asymmetrie für Wasserstoff. Die gestrichelten Linien liegen bei eins, während die durchgezogene Linie die Anpassung einer konstanten Funktion an die Daten wiedergibt.

$\frac{\Delta g}{g}(x)$, d. h. die Verteilungsfunktion der Gluonpolarisation, aus welcher die Gluonhelizität $\Delta g(x)$ unmittelbar durch Multiplikation mit der recht gut bekannten unpolarisierten Gluon-Verteilungsfunktion $G(x)$ extrahiert werden kann. Die gesuchte Größe ΔG wird dann im experimentell zugänglichen Bereich $[x_1, x_2]$ über $\Delta G = \int_{x_1}^{x_2} dx \frac{\Delta g}{g}(x) \cdot g(x)$ ermittelt, während deren Werte unter- bzw. oberhalb dieses Bereichs immer durch theoriebasierte Extrapolation bestimmt werden müssen. Im HERMES-Experiment werden am HERA-Beschleuniger Wechselwirkungen longitudinal polarisierter Positronen der Energie 27.5 GeV mit ebenfalls longitudinal polarisierten Protonen oder Deuteronen des internen HERMES-Gastargets untersucht. Als Messgröße zur Bestimmung der Gluonpolarisation dienen Doppelspin-Asymmetrien im Wirkungsquerschnitt inklusiver geladener Hadronen. Ein gewisser Anteil dieser Teilchen wird erzeugt durch Wechselwirkung des vom Strahlteilchen abgestrahlten virtuellen Photons mit einem Gluon im Nukleon und nicht, wie in den meisten Fällen, einem Quark im Nukleon. Im Rahmen und unter Ausnutzung eines QCD-basierten Quark-Parton-Modells, welches vom Monte Carlo Simulationsprogramm Pythia verwendet wird, bietet diese Reaktion die Möglichkeit, Informationen über die Verteilungsfunktion der Gluonpolarisation $\frac{\Delta g}{g}(x)$ zu er-

halten. Insbesondere werden dazu Hadronen gebraucht, die mit möglichst hohem Transversalimpuls (p_T^{beam}) erzeugt worden sind, weil dieser bevorzugt bei der (harten) Streuung am Gluon entsteht. Nur durch Auswahl dieser Ereignisse ist es möglich, den Untergrund von anderen Prozessen genügend stark zu reduzieren. Der o. g. Anteil der Gluonen am Streuprozess ist a priori unbekannt und muss in einer aufwendigen Monte Carlo Simulation ermittelt werden. Bei den relativ niedrigen Strahlenergien, welche heutigen Festtarget-Experimenten wie z. B. HERMES zur Verfügung stehen, sind die verschiedenen dabei zu modellierenden Prozesse nicht genügend genau bekannt. Diese Ungenauigkeit stellt den Hauptanteil des systematischen Fehlers der Messung dar, welcher erstmalig überhaupt detailliert ermittelt wurde.

Die am Proton bzw. Deuteron für positive (negative) Hadronen h^+ (h^-) gemessenen Asymmetrien sind in Abbildung 43 dargestellt. Analysiert wurden Ereignisse ohne Registrierung des gestreuten Positrons (Photoproduktion), einer Ereignisklasse mit bestmöglicher Statistik. Die Darstellung der aus der Monte Carlo (MC) Simulation erwarteten Asymmetrien für $\Delta g/g = 0, \pm 1$ (Kurven) über p_T^{beam} zeigt, dass schon für Hadron-Transversalimpulse oberhalb von 1 GeV Asymmetrien

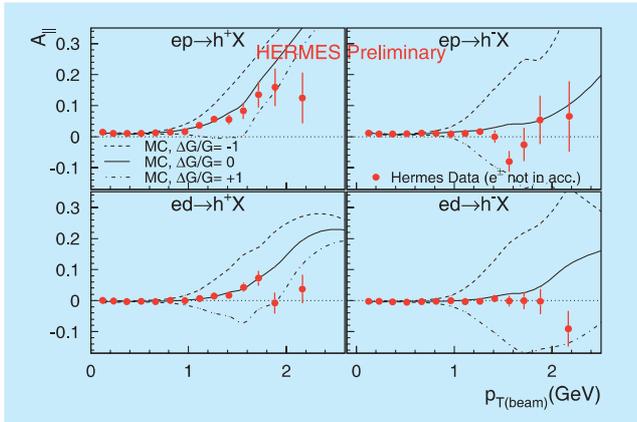


Abbildung 43: Gemessene Asymmetrien für die Produktion von positiven (links) und negativen (rechts) Hadronen an einem Proton- und Deuteriumtarget. Die Kurven stellen Berechnungen dieser Asymmetrien innerhalb eines Monte Carlo Modells für verschiedene angenommene Werte von $\Delta g/g$ dar:

erwartet werden, die deutlich von $\Delta g/g$ abhängen. Bedingt durch die jeweils verschiedenen Quark-Zusammensetzungen, je nach nach Typ des Targetnucleons und Ladung des erzeugten Hadrons, ergeben sich dabei recht unterschiedliche Erwartungen an die zu messenden Asymmetrien. Obwohl die gemessenen Daten recht starke, systematisch bedingte Fluktuationen zeigen, kann schon von diesem Vergleich mit den Erwartungen für verschiedene angenommene Werte von $\frac{\Delta g}{g}$ (durchgehende bzw. gestrichelte Kurven) geschlossen werden, dass der Wert von $\frac{\Delta g}{g}$ nicht allzuweit von Null verschieden sein dürfte.

Es gibt keine eindeutige kinematische Zuordnung zwischen dem (gemessenen) Transversalimpuls des Hadrons p_T^{beam} und dem (gesuchten) Anteil des Gluons am Nukleonimpuls x . Darüber hinaus hängt die Messgröße p_T^{beam} von der Experimentkinematik ab, weshalb ein Vergleich der Resultate verschiedener Experimente eine Darstellung von $\Delta g/g$ über x erfordert. Für die Umrechnung wurden zwei unterschiedliche Methoden verwendet. Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse beider Methoden im Vergleich, hier noch in Abhängigkeit von p_T^{beam} . Der innere Bereich der Fehlerbalken im linken Bild (Methode I) zeigt die statistische Ungenauigkeit, der gesamte Balken die kombinierte statistische und

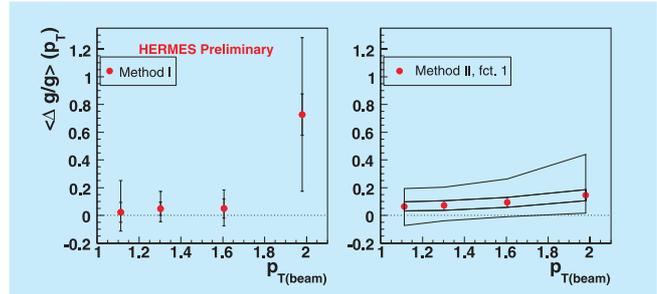


Abbildung 44: Ergebnisse der Extraktion der Gluonpolarisation aus den gemessenen Asymmetrien für die zwei verschiedenen, im Text erklärten Methoden in Abhängigkeit vom Transversalimpuls der Hadronen.

systematische Ungenauigkeit. Im rechten Bild illustriert der Korridor, dass die zweite Methode (Methode II) eine funktionale Abhängigkeit liefert (der Innenkorridor zeigt die statistische und der Aussenkorridor die systematische Ungenauigkeit), während dort die Punkte nur zur Illustration dienen. Beide Methoden liefern konsistente Ergebnisse.

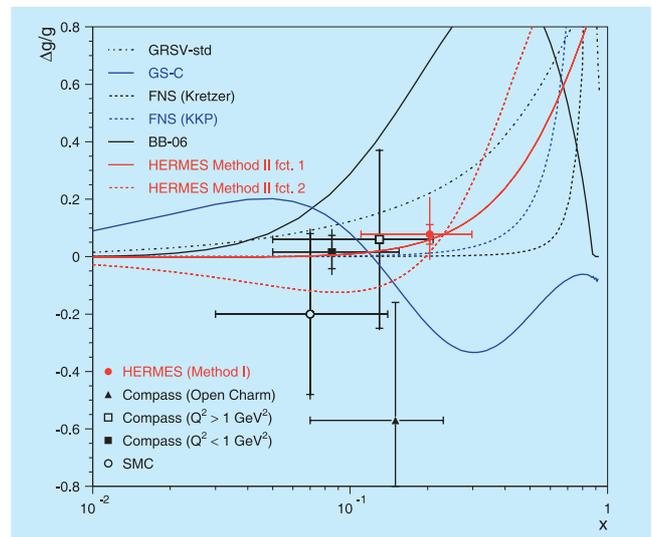


Abbildung 45: Ergebnisse der Extraktion der Gluonpolarisation aus den gemessenen Asymmetrien für die zwei verschiedenen, im Text erklärten Methoden in Abhängigkeit von x . Ebenfalls dargestellt sind die derzeit verfügbaren Ergebnisse anderer Experimente (Messpunkte) sowie eine Vielzahl theoretischer Vorhersagen (Kurven).

In Abbildung 45 werden die Ergebnisse beider Methoden in Abhängigkeit von x gezeigt, gemeinsam mit jüngsten Ergebnissen des COMPASS-Experiments, welches speziell für die Messung der Gluonpolarisation durchgeführt wird. Gleichzeitig wird eine Vielzahl theoretischer Vorhersagen gezeigt, welche aus QCD-Analysen stammen, die auf inklusiven und semi-inklusiven Messungen des tiefinelastischen Lepton-Nukleon Streuprozesses basieren. Deren Variation untereinander repräsentiert den Stand der gegenwärtigen theoretischen Kenntnis über $\frac{\Delta g}{g}(x)$. Demgegenüber zeigt das vorliegende HERMES-Ergebnis (Methode I, gefüllter Punkt), wie auch schon das jüngste COMPASS-Ergebnis (gefülltes Quadrat) den aktuellen Stand der experimentellen Genauigkeit. Mit diesen beiden Messungen ist es erstmals gelungen, den Anteil ΔG der Gluonen am Spin des Nukleons im Bereich mittlerer x (0.06 ... 0.3, wo die unpolarisierte Gluon-Verteilungsfunktion $g(x)$ nur moderate Werte annimmt, deutlich einzugrenzen: dort ist die polarisierte Gluon-Verteilungsfunktion $\Delta g(x)$ sehr klein bzw. sogar mit Null verträglich.

Messung der Strange-Quark Polarisation ΔS des Nukleons

Die Helizitätsverteilung $\Delta S(x)$ der Strange-Quarks und -Antiquarks im Nukleon ist vor allem deshalb von großem Interesse, da sich damit die Eigenschaften des Quark-Sees untersuchen lassen. Im Gegensatz zu Up- und Down-Quarks kommen Strange-Quarks nicht als Valenzquarks vor, sondern treten ausschließlich als Quantenfluktuationen im Quarksee in Erscheinung.

HERMES ist aufgrund seiner sehr leistungsfähigen Teilchenidentifizierungs-Detektoren besonders gut für eine solche Messung geeignet: geladene Kaonen, Pionen und Protonen können praktisch im gesamten von HERMES abgedeckten Impulsbereich sehr gut voneinander getrennt werden. Dies ermöglicht die Anwendung der Methode des Flavour-Taggings in der Analyse der Daten. Die grundlegende Idee hierbei ist, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Flavour des im tiefinelastischen Streuprozesses getroffenen Quarks

und den hinterher beobachteten Hadronen gibt. Findet man beispielsweise im Endzustand eines solchen Streuprozesses ein positiv geladenes Kaon K^+ , so liegt die Schlussfolgerung nahe, dass im Streuprozess entweder ein Up-Quark oder ein Anti-Strange-Quark getroffen wurde, da das K^+ -Meson aus diesen beiden Teilchen aufgebaut ist.

Angenommen das beobachtete K^+ -Meson stammt in der Tat von einem Anti-Strange-Quark, das durch eine Quantenfluktuation innerhalb des Protons kurzzeitig als virtuelles Teilchen entstanden ist. Im nächsten Augenblick wäre es bereits wieder mit seinem zugehörigen Strange-Quark annihiliert, wenn durch die Kollision nicht genau im richtigen Moment genügend Energie zugeführt würde, um die virtuellen Teilchen in reale Teilchen zu verwirklichen. In diesem Fall könnten wir mittels einer gemessenen Spin-Asymmetrie direkt Rückschlüsse auf die Helizitätsverteilung der Anti-Strange-Quarks im Nukleon ziehen!

Leider macht es uns die Natur nicht ganz so einfach, denn es ist ebenfalls möglich, dass in Wirklichkeit das Up-Quark getroffen wurde und das Anti-Strange-Quark lediglich im sogenannten Fragmentationsprozess, bei dem sich die Quarks wieder zu Hadronen zusammenfinden, erzeugt wurde. Dann hätte die beobachtete Spin-Asymmetrie lediglich etwas mit der Helizitätsverteilung der Up-Quarks zu tun, da das im K^+ -Meson enthaltene Anti-Strange-Quark zum Zeitpunkt des Streuprozesses noch gar nicht existierte.

Es ist sogar möglich, dass *keines* der beiden Quarks aus dem Nukleon stammt und die Bestandteile des K^+ -Mesons ausschließlich bei der Fragmentation gebildet wurden.

Doch auch wenn es keine eindeutige Zuordnung zwischen den Hadronen im Endzustand und dem Flavour der getroffenen Quarks gibt, ist die Situation nicht völlig hoffnungslos: wenn man ein Kaon im Endzustand findet, ist es immerhin *wahrscheinlicher*, dass ein Strange- oder Anti-Strange-Quark getroffen wurde als in anderen Fällen. Dieser komplizierte statistische Zusammenhang wird mittels sogenannter Fragmentationsfunktionen beschrieben. Eine Fragmentationsfunktion gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein

Quark der Sorte q letztlich in einem Hadron vom Typ h endet. Es gibt beispielsweise eine Fragmentationsfunktion, die ausdrückt, wie wahrscheinlich es ist, dass ein im Streuprozess getroffenes Anti-Strange-Quark in ein K^+ -Meson fragmentiert und eine weitere Fragmentationsfunktion, die denselben Zusammenhang für den Fall beschreibt, dass ein Up-Quark getroffen wurde. Auf diese Weise lässt sich dann letztendlich doch der Zusammenhang zwischen einer gemessenen Kaonen-Spinasymmetrie und der Helizitätsverteilung der Strange- und Anti-Strange-Quarks herstellen.

Ein großes Problem bisheriger Messungen bestand vor allem darin, dass diese Fragmentationsfunktionen mit beträchtlichen systematischen Ungenauigkeiten behaftet sind, da sie aus Messungen von e^+e^- -Kollisionsexperimenten bei wesentlich höheren Energien stammen. Bei solch hohen Energien ist die Näherung, dass Up-, Down- und Strange-Quarks die selbe Masse haben, gerechtfertigt, da die Quarkmassen verschwindend klein im Vergleich zur verfügbaren Energie sind. Hingegen sind diese Massenunterschiede zwischen verschiedenen Quarksorten im HERMES-Energiebereich durchaus relevant und können nicht einfach vernachlässigt werden. Bei der folglich zur Anwendung auf die HERMES-Daten erforderlichen Extrapolation ergeben sich die oben erwähnten, beträchtlichen systematischen Unsicherheiten. Immerhin sah es jedoch bereits mit diesen Fragmentationsfunktionen im Rahmen der Messgenauigkeit sehr danach aus, dass die Polarisation der Strange-Quarks mit Null verträglich ist und die Strange-Quarks somit kaum zum Spin des Nukleons beitragen.

Mit einem neuen Analyseansatz gelang es nun kürzlich, dieses Ergebnis mit erheblich verbesserter Präzision zu bestätigen. Basis für diese neue Analyse ist der statistisch sehr umfangreiche Datensatz aus dem Jahr 2000, der mit einem polarisierten Deuteron-Target genommen wurde. Da das Deuteron ein isoskalares Target ist, kann der Fragmentationsprozess beschrieben werden, ohne dass zusätzliche Annahmen bezüglich isospinabhängiger Fragmentation notwendig wären. Auch tragen Strange-Quarks keinen Isospin, so dass die Strange-Quark-Seeverteilungen bei Proton und Neutron identisch sind. Damit kann dann unter der

Annahme von Isospinsymmetrie sowie Invarianz des Fragmentationsprozesses unter Ladungskonjugation direkt aus den HERMES Deuteron-Target-Daten nicht nur die Kaonen-Spinasymmetrie sondern auch die erforderliche Fragmentationsfunktion von Strange- und Anti-Strange-Quarks in geladene Kaonen (K^+ und K^- zusammengenommen) gewonnen werden. Der große Vorteil dieser Methode besteht darin, dass nun keine Extrapolation „fremder“ Fragmentationsfunktionen in den HERMES-Energiebereich mehr erforderlich ist.

Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 46 dargestellt. Aufgetragen ist die Summe der Strange- und Anti-Strange-Quark-Polarisation $\Delta S(x)$ gegen die Bjorken-Skalen-Variable x . Übereinstimmend mit früheren HERMES-Messungen geben die neuen Resultate im Bereich $0.02 < x < 1$ keinen Hinweis auf eine von Null verschiedene Polarisation des Strange-Quark-Sees. Das Integral über den von HERMES untersuchten kinematischen Bereich ergibt den Wert $\int_{0.02}^1 \Delta S dx = 0.006 \pm 0.029 \pm 0.007$.

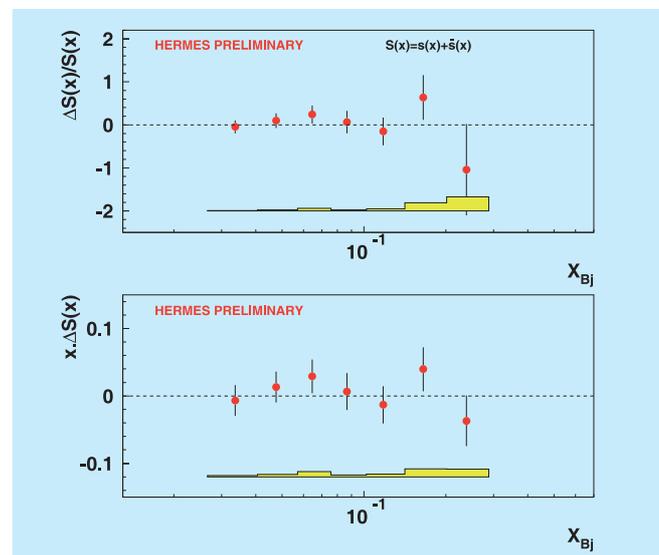


Abbildung 46: Ergebnis der neuen isoskalaren Analyse der HERMES-Deuteron-Daten. In Übereinstimmung mit bereits früher publizierten HERMES-Resultaten – jedoch nun mit deutlich gesteigerter Präzision – beobachtet man im kinematischen Bereich $0.02 < x < 1$ eine mit null verträgliche Polarisation der Strange-Seequarks.

HERA-B-Experiment

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

Sprecher: M. Medinnis, DESY

Die HERA-B-Kollaboration untersucht Eigenschaften der Produktion schwerer Quarks in Kollisionen von Protonen mit den Atomkernen aus dünnen Drähten im Halo des HERA-Protonstrahls. Ziel der Untersuchungen ist die Messung der Wirkungsquerschnitte für die Produktion von schweren Quarks mit den Flavour-Quantenzahlen Beauty, Charm und Strangeness in Quark-Antiquark-Bindungszuständen, wobei in dem Bindungspaar entweder beide Partner schwere Quarks sind oder ein Partner ein leichtes (Up oder Down) Quark ist. Mit einer großen Akzeptanz, vorzüglicher Teilchenidentifikation und einem hochauflösendem Vertexdetektor bieten die Daten des HERA-B-Spektrometers die besten Voraussetzungen für die Rekonstruktion komplexer Vielteilchen-Endzustände, wie es für solche Studien notwendig ist.

Im Berichtsjahr sind Analysen zur Produktion von Mesonen, die Strange-, Charm- oder Beauty-Quarks enthalten, sowie eine Messung der Polarisation von Λ -Baryonen veröffentlicht worden. Die Untersuchungen basieren auf zwei großen Datensätzen, die während der letzten Datennahmeperiode von HERA-B 2002/03 aufgezeichnet wurden. Einer der Datensätze enthält insgesamt 150 Millionen Ereignisse, die mit dem Zwei-Lepton-Trigger genommen wurden, der andere enthält 200 Millionen Ereignis-

se, die mit einem einfachen *Minimum Bias* Trigger genommen wurden.

Beauty-Produktion

HERA-B hatte bereits Ergebnisse von Messungen der totalen Wirkungsquerschnitte für Beauty-Quark-Produktion (b, \bar{b}) sowohl im Kontinuum als auch als Υ -Zustände, das sind gebundene $b\bar{b}$ -Zustände, veröffentlicht. Mit einer neuen Auswertung des $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitts, die auf einer anderen Methode als für die erste Veröffentlichung beruht, sind jetzt die Studien zur Beauty-Produktion abgeschlossen worden. Die erste HERA-B-Publikation basierte auf der Rekonstruktion von B-Meson-Zerfällen des Typs $B \rightarrow J/\psi X$. Dagegen nutzt die neue Analyse den relativ häufigen semileptonischen Zerfallskanal von b-Hadronen (Teilchen, die einzelne Beauty-Quarks enthalten). Die b-Hadronen werden immer in Teilchen-Antiteilchen-Paaren (ein Partner mit einem b, der andere mit einem \bar{b}) erzeugt. Gelegentlich zerfallen beide b-Hadronen semileptonisch, so dass das Ereignis zwei Leptonen aus b-Hadronzerfällen enthält. Das HERA-B-Triggersystem, das besonders sensitiv auf diese Di-Lepton-Signaturen ist, veranlasst die Registrierung dieser Ereignisse für die spätere Auswertung. Die Analyse dieser Ereignisse

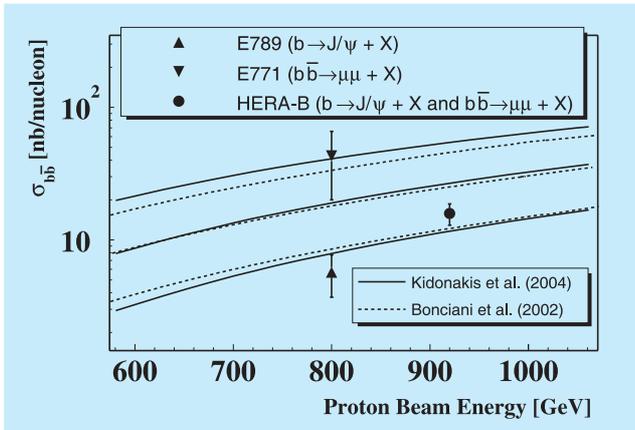


Abbildung 47: Der Wirkungsquerschnitt für inklusive $b\bar{b}$ -Produktion als Funktion der Protonenenergie in fixed target Proton-Kern-Kollisionen. Die Messungen werden mit zwei theoretischen Vorhersagen verglichen. Der Bereich der theoretischen Unsicherheit ist gezeigt.

erlaubte eine weitgehend unabhängige Messung des $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitts, die in der Präzision mit der ersten Messung vergleichbar und mit dieser verträglich ist. Das kombinierte Ergebnis ist in Abbildung 47 zusammen mit den anderen verfügbaren Messungen und theoretischen Vorhersagen dargestellt. Die HERA-B-Messung ist im Schwellenbereich der $b\bar{b}$ -Produktion bei weitem die genaueste und ist mit den theoretischen Erwartungen in Übereinstimmung.

Hidden Charm: Ein Vergleich der ψ' - und J/ψ -Produktion

HERA-B hatte im letzten Jahr den J/ψ -Wirkungsquerschnitt veröffentlicht und hat nun die Messungen von Mitgliedern der Charmonium-Familie mit einer neuen Publikation zur Produktion von ψ' -Mesonen erweitert. Im Gegensatz zu der Messung des J/ψ -Wirkungsquerschnitts, für die der *minimum bias* Datensatz benutzt wurde, ist die neue Messung eine Analyse von Daten, die mit dem Di-Lepton-Trigger genommen wurden. Die möglichen systematischen Unsicherheiten, zum Beispiel durch den hochselektiven Trigger, werden minimiert, indem der ψ' -Wirkungsquerschnitt nicht di-

rekt gemessen wird, sondern das Verhältnis $R_{\psi'}$ von der ψ' - zur J/ψ -Produktion, wobei beide Teilchen über die bekannten leptonenischen Zerfälle nachgewiesen werden. Abbildung 48 zeigt eine Zusammenstellung früherer Messungen von $R_{\psi'}$, gewichtet mit dem Verhältnis der jeweiligen Wahrscheinlichkeiten für den leptonenischen Zerfall, zusammen mit der HERA-B-Messung, getrennt für verschiedene Target-Kerne. Zur Kompensation nuklearer Effekte wurden die Ergebnisse von verschiedenen Targets mit dem empirischen Faktor $A^{0.029}$ multipliziert. Die Graphik enthält auch die theoretischen Vorhersagen des *Color Evaporation Model* (CEM) und des nichtrelativistischen QCD-Modells (NRQCD). Die Messungen stimmen mit der flachen Energieabhängigkeit des CEM überein und begünstigen weniger das NRQCD-Modell, ohne es allerdings ausschließen zu können.

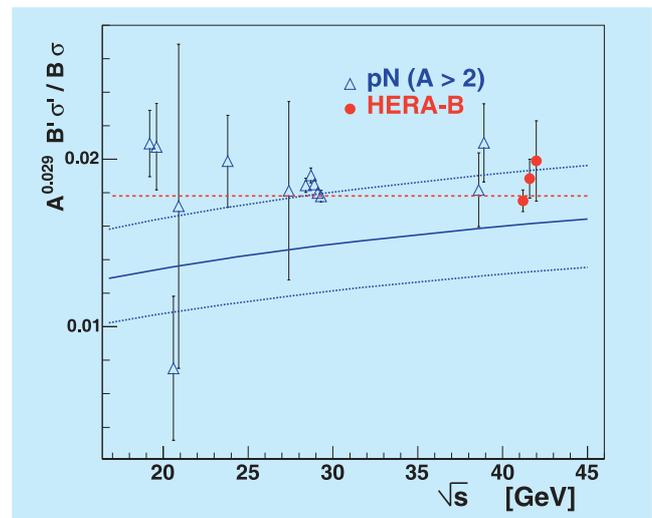


Abbildung 48: Eine Zusammenstellung der Messungen von $R_{\psi'}$ in Proton-Kern-Kollisionen als Funktion der Proton-Nukleon-Schwerpunktsenergie. Die gemessenen Verhältnisse wurden mit dem Faktor $A^{0.029}$ skaliert, um die bekannten nuklearen Effekte zu kompensieren. Die HERA-B-Ergebnisse sind getrennt für Kohlenstoff, Titan und Wolfram dargestellt. Die CEM-Erwartung entspricht der gestrichelten Linie, die des NRQCD-Modells der durchgezogenen Linie mit einem Bereich für die theoretischen Unsicherheiten, die durch die gepunkteten Linien angegeben werden.

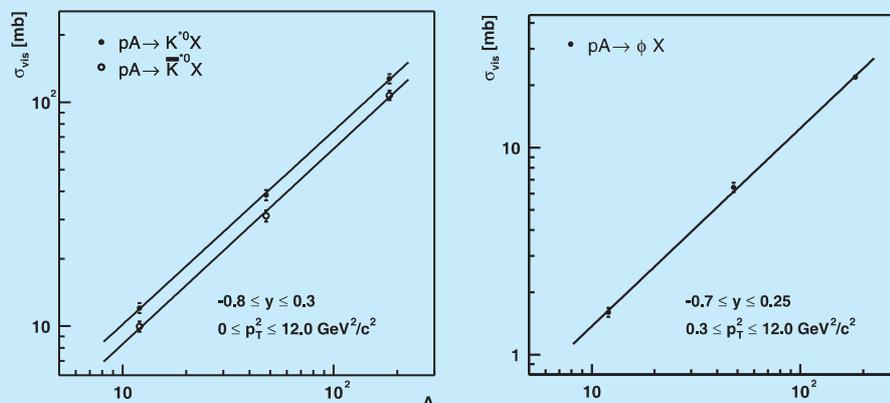


Abbildung 49: Die Abhängigkeit des inklusiven Wirkungsquerschnitts für (links) K^{*0}/\bar{K}^{*0} - und (rechts) ϕ -Produktion von der Kernmassenzahl in dem angegebenen kinematischen Bereich. Die eingezeichneten Kurven sind Anpassungen des oben angegebenen Potenzgesetzes mit den in Tabelle 4 aufgeführten Parametern.

Mesonen mit Strange-Quarks

Das leichteste der schweren Quarks, das Strange-Quark, ist nicht schwer genug, um zuverlässige Vorhersagen über die Produktions-Wirkungsquerschnitte mit Hilfe perturbativer QCD-Rechnungen zu erlauben. Dennoch sind solche Messungen sinnvoll, um experimentell ein abgerundetes Bild der Produktion schwerer Quarks in Proton-Kern-Stößen zu erhalten. Untersucht wird damit auch, ob Strangeness-Produktion als diagnostisches Werkzeug für die Auswertung von Schwerionen-Experimenten geeignet ist, weil man glaubt, dass für die Bildung eines Quark-Gluon-Plasmas in Kollisionen von schweren Kernen die erhöhte Produktion von Strangeness charakteristisch ist. Weil theoretische Vorhersagen, wie bereits erwähnt, sehr schwierig sind, sind präzise Messungen der Strangeness-Produktion in Proton-Kern-Reaktionen (in denen kein Quark-Gluon-Plasma gebildet wird) zum Vergleich mit Schwerionen-Kollisionen besonders wichtig. Die Messung des sichtbaren Produktions-Querschnitts, das heißt des Teils der in der Detektorakzeptanz liegt, für drei Vektormesonen (K^{*0} , \bar{K}^{*0} , ϕ), die Strange-Quarks enthalten, und für drei verschiedene Targets (Kohlenstoff, Titan und Wolfram) sind in Abbildung 49 gezeigt. Die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts

von der Massezahl A des Targetkerns (σ_{pA}) kann beschrieben werden durch ein Potenzgesetz der Form $\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \cdot A^\alpha$, wobei σ_{pN} der Produktions-Querschnitt in Proton-Nukleon-Reaktionen ist. Anpassungen dieser Form an die Daten sind in der Abbildung angegeben. Die Anpassungsparameter, die in der eingeschränkten Akzeptanz des Spektrometers bestimmt wurden, sind in Tabelle 4 als Extrapolation auf den gesamten kinematischen Bereich angegeben. Im Vergleich zu der Strangeness-Produktion zeigt der totale inelastische Wirkungsquerschnitt mit einem Exponenten $\alpha = 0.71 \pm 0.01$ eine viel schwächere A -Abhängigkeit. Während der inelastische Wirkungsquerschnitt etwa mit der Querschnittsfläche des Kerns skaliert, entsprechend $\alpha = 2/3$, ist die K^{*0} - und ϕ -Produktion nahezu proportional zum Kernvolumen, entsprechend $\alpha = 1$.

	$pN \rightarrow K^{*0}X$	$pN \rightarrow \bar{K}^{*0}X$	$pN \rightarrow \phi X$
α	0.87 ± 0.03	0.87 ± 0.03	0.91 ± 0.02
$\sigma_{pN}[\text{mb}]$	5.06 ± 0.54	4.02 ± 0.45	1.17 ± 0.11

Tabelle 4: Abhängigkeit von der Kernmassenzahl und extrapolierte Produktions-Wirkungsquerschnitte. Die angegebenen Fehler fassen statistische und systematische Beiträge zusammen.

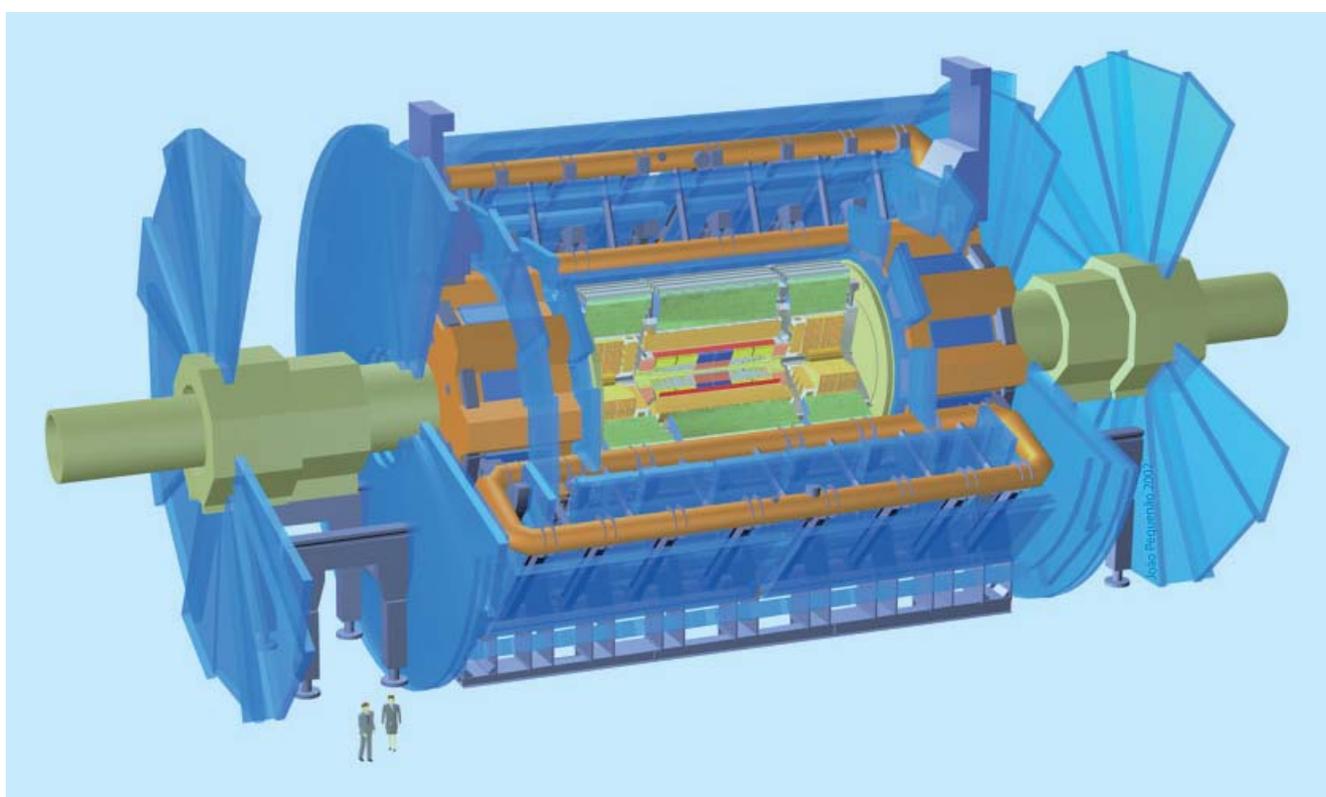


Abbildung 50: Aufbau des ATLAS Detektors.

ATLAS-Experiment

Gruppenleiter: K. Moenig, DESY

Ende 2005 hat DESY beschlossen, beide großen Experimente am Large Hadron Collider, LHC, zu unterstützen. Die DESY Gruppe wurde formal im Juli 2006 in die ATLAS Kollaboration aufgenommen. Sie besteht zur Zeit aus sechs permanenten Mitarbeitern, vier Postdocs und vier Doktoranden. Die Beteiligung an ATLAS erfolgt in enger Kooperation mit einer Gruppe der Humboldt Universität zu Berlin und einem Juniorprofessor der Universität Hamburg. Alle übernommenen Aufgaben werden gemeinsam bearbeitet. Die Gruppe arbeitet am ATLAS Computing, den höheren Trigger Stufen, sowie an der schnellen Schauersimulation. Diese Aktivitäten werden im weiteren näher beschrieben. Außerdem beteiligt sich DESY an der Koordination der Outreach Aktivitäten für den LHC in Deutschland. Ab Ende 2006 stellt die DESY ATLAS Gruppe den Koordinator der deutschen LHC Outreach-Gruppe GELOG. Erste Aktivitäten begannen im Multimedia-Bereich.

Zu Beginn der Beteiligung konzentrieren sich natürlicherweise die Aktivitäten im Servicebereich, es wurde jedoch schon in begrenztem Maße mit Physikstudien begonnen. Im Bereich der Supersymmetrie wurden Studien zur Rekonstruktion von Zwei-Lepton Endzuständen durchgeführt. Besonderer Wert wurde dabei auf die Entwicklung eines Software Rahmens gelegt, der es erlaubt, die Daten schnell und effizient zu analysieren und der flexibel genug ist, um von allen Mitgliedern der DESY Gruppe und allgemein verwendet zu werden.

Als zweite Aktivität nahe an der Physik wird ein Eventfilter Algorithmus für *Minimum-Bias Ereignisse* entwickelt, der diese Ereignisse bei sehr niedriger Lumi-

nosität selektieren kann. Mit *Minimum-Bias* werden Ereignisse bezeichnet, bei denen Quarks oder Gluonen mit sehr niedrigen Energien wechselwirken. Bei höheren Luminositäten treten mehrere solcher Ereignisse pro Strahlkreuzung auf und erschweren die Analyse interessanter Prozesse. Bei niedrigen Luminositäten kann man sie einzeln selektieren und analysieren, um so den zu erwartenden Untergrund bei hoher Luminosität zu verstehen.

Der ATLAS Detektor wiegt 7000 Tonnen und füllt mit einem Durchmesser von 25 m und einer Länge von 46 m (Abbildung 50) seine unterirdische Halle (35 m Höhe, 30 m Breite, 53 m Länge) gut aus. Eine Besonderheit sind große Toroiden (Abbildung 51), die mit einer leichten und offenen Konstruktion ein optimales Magnetfeld von 4 Tesla in einem großen Volumen erzeugen und damit eine präzise Vermessung von Muonspuren ermöglichen.

Computing

Der instrumentelle Hauptbeitrag von DESY für beide Experimente liegt in der Bereitstellung je eines Tier-2 Zentrums pro Experiment für die Simulation und die Datenanalyse. Der Aufbau des ATLAS WLCG Tier-2 Grid-Rechenzentrums bei DESY geschah in engem Kontakt mit den IT Gruppen in Hamburg und Zeuthen. Es wurde begonnen, die Zusammenarbeit zwischen dem deutschen Tier-1 bei GridKa, dem Tier-2 und dem Rechnen an Universitäten im deutschlandweiten ATLAS Computing zu koordinieren. Das Tier-2 Zentrum ist im Kapitel Zentrale Datenverarbeitung auf Seite 296 detailliert beschrieben.

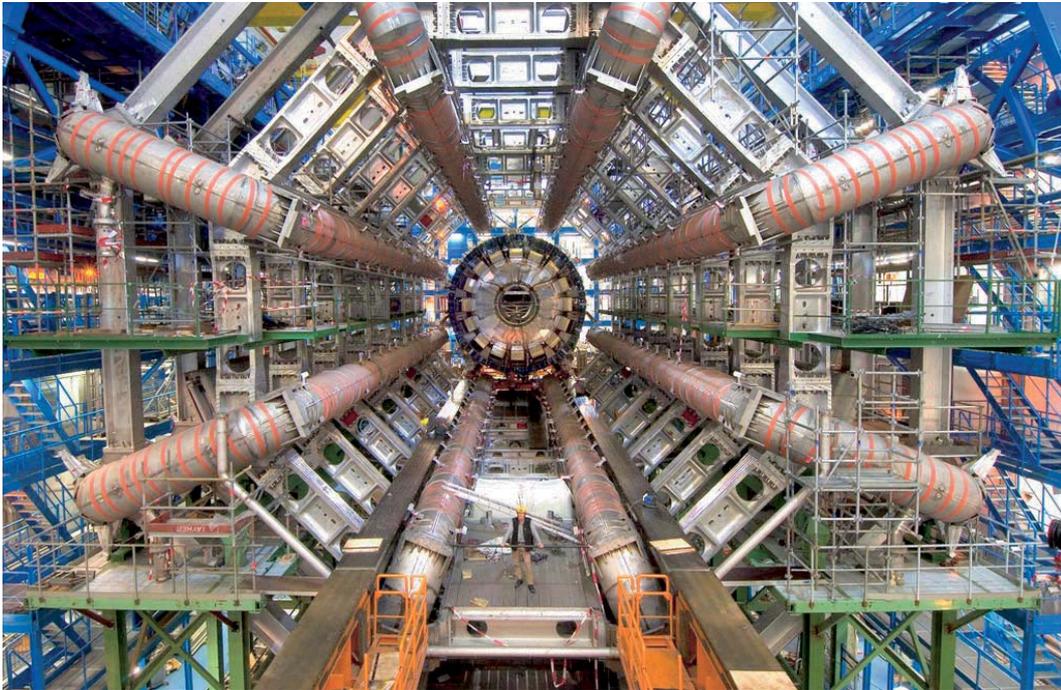


Abbildung 51: Die Toroiden des ATLAS Barrels.

Als Verbindung zwischen ATLAS und dem Tier-2 beteiligt sich DESY am Computing von ATLAS, insbesondere an der Entwicklung von Grid-Werkzeugen. Neben der Grid-Software wurden die ATLAS Softwarepakete zur lokalen Nutzung auf den Rechnern in Hamburg und Zeuthen bereitgestellt. DESY stellt einen Vertreter im ATLAS International Computing Board.

Der ATLAS Trigger

Wegen der hohen Wechselwirkungsraten sind die Triggersysteme der LHC Experimente besonderes wichtige Komponenten. Für das ATLAS Experiment ist ein dreistufiges Triggersystem vorgesehen, um die Ereignisraten von der anfänglichen Bunch-Crossing-Rate von 40 MHz auf einige hundert Hz zu reduzieren. Dabei ist die erste Triggerstufe (LVL1) in speziell gefertigter Elektronik gebaut. Sie reduziert die Raten innerhalb von 1.5 Mikrosekunden auf ungefähr 100 kHz. Zur Selektion werden ausschließlich Daten aus den Kalorimetern und den Muon-Systemen verwendet. Auch

die wichtige Identifikation des Bunch-Crossings wird auf der ersten Triggerstufe vorgenommen. Die Selektion der zweiten und dritten Triggerstufe wird von Softwareprozessen übernommen, die auf großen Computerfarmen laufen. Diese beiden Triggerstufen werden unter dem Namen *High-Level-Trigger* (HLT) zusammengefasst. Auf der zweiten Triggerstufe (LVL2) haben die Selektionsalgorithmen Zugang zur vollen Granularität der Daten, allerdings nur in sogenannten *Regions-of-Interest*, die vorher von der ersten Stufen identifiziert worden sind. Für die vorgesehene Ratenreduktion auf ca. 1 KHz stehen der zweiten Stufe im Durchschnitt 10 ms zur Verfügung. Erst die dritte Triggerstufe, Event-Filter (EF) genannt, läuft nach dem Eventbuilding und hat somit Zugang zum gesamten Ereignis. Dort wird die Datenrate auf einige hundert Hz reduziert. Das ATLAS Triggersystem ist in Abbildung 52 skizziert.

Während des Jahres wurden große Fortschritte im Aufbau dieses Triggersystems gemacht. Viele wichtige Komponenten der ersten Triggerstufe, wie der zentrale Trigger oder das Muon-Trigger-Interface sind be-

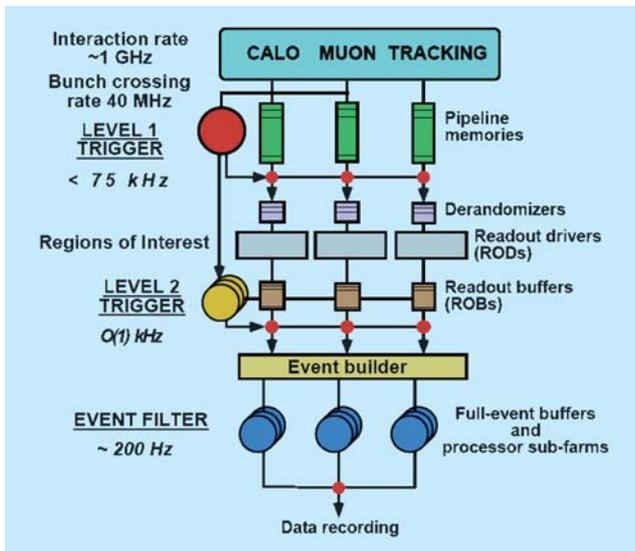


Abbildung 52: Das ATLAS Triggersystem.

reits vollständig am Experiment installiert. Auch ein Großteil der HLT/DAQ-Infrastruktur, wie Netzwerk, Racks, etc. ist bzw. wird bereits am Experiment installiert. Allerdings sind erst ca. 10% der LVL2- und EF-Computerfarm zu Testzwecken aufgebaut. Die restlichen Rechner werden zu einem möglichst späten Zeitpunkt beschafft, um von leistungsfähigerer Computertechnologie profitieren zu können.

Die ATLAS Gruppe am DESY engagiert sich vorwiegend bei der Implementation von wichtigen Softwarekomponenten zum Betrieb des ATLAS Triggers. So ist die Gruppe verantwortlich für den Aufbau des Systems, das in der späteren Datennahme die Selektion des HLT überwachen soll (Monitoring). Auch das Konfigurationssystem wird von der DESY-Gruppe implementiert.

Trigger Konfiguration

Das Konfigurationssystem des ATLAS Triggers versorgt die verschiedenen Triggerstufen mit allen Parametern, die für die Selektion der interessanten Ereignisse während der Datennahme benötigt werden. Es übernimmt auch die Archivierung dieser Parameter für die spätere Datenanalyse. Dasselbe System soll auch zur Konfiguration der Trigger-relevanten Teile in Re-

konstruktion und Simulation von Ereignissen eingesetzt werden.

Die zentrale Komponente des Konfigurationssystems ist die Trigger Datenbank (TriggerDB), in der die gesamte Information, die zur Konfiguration des Triggers nötig ist, gespeichert wird. Die TriggerDB ist eine relationale Datenbank, die mit ORACLE und MySQL Technologie betrieben werden kann und letztlich ein Bestandteil der ATLAS online Datenbank sein wird.

Zu Beginn der Datennahme (oder Simulation) ziehen die Komponenten des Triggers die Konfigurationsdaten aus der TriggerDB. Weil die HLT Prozesse auf ca. 3000 Rechnerknoten ablaufen sollen, ist vor allem die schnelle Verteilung der HLT Parameter eine Herausforderung. Während der Datennahme werden die Parameter dann angewendet und in der TriggerDB markiert, so dass sie nicht mehr verändert werden können und für die spätere Datenanalyse zur Verfügung stehen. Auch das Interface zur späteren Datenanalyse, das für die Interpretation der Triggerentscheidung in jedem Ereignis benötigt wird, und damit auch das zugrundeliegende Analysemodell ist Teil der Arbeit am Konfigurationssystem. Zum Füllen der TriggerDB wird ein grafisches Interface (TriggerTool) in Java entwickelt. Dieses erlaubt es, komplizierte Menüs übersichtlich darzustellen und einfach zu verändern, so dass alle Abhängigkeiten berücksichtigt werden.

Die DESY Gruppe ist an der Entwicklung aller Teile des Systems führend beteiligt. Am DESY ist die TriggerDB aufgesetzt, um Tests durchzuführen und die Entwicklung voranzubringen. Nach einer positiven Bewertung des Systems innerhalb eines ATLAS internen Reviews im Herbst 2006 wird weiter mit Hochdruck an der Realisierung des Systems gearbeitet, so dass es zum vorgesehenen Beginn der Datennahmen im Herbst 2007 mit voller Funktionalität zur Verfügung stehen wird.

Trigger Monitoring

Für eine erfolgreiche Datennahme ist es wichtig, die Funktion des Triggers laufend zu überwachen. Zum einen muss der Schichtbesatzung die Möglichkeit gegeben werden, im Falle einer Fehlfunktion schnell ein-



Abbildung 53: Vorgeschlagene Benutzeroberfläche für die Überwachung des Triggers.

greifen zu können, um einen Datenverlust zu minimieren, zum anderen müssen aber auch Perioden, in denen wesentliche Teile des Triggers nicht wie vorgesehen funktioniert haben, von der Datenanalyse ausgeschlossen werden. DESY hat zusammen mit einer Gruppe der Humboldt Universität beide Aspekte der Triggerüberwachung übernommen.

Da die höheren Triggerstufen bei ATLAS aus Software bestehen, die auf Standardrechnersystemen laufen, kann das Trigger Monitoring leicht in diese Programme integriert werden. Dies erlaubt einen Zugriff auf alle für die Ereignisselektion verwendete Information, sowohl für die selektierten als auch für die verworfenen Ereignisse. Dazu wird bei DESY ein Programm entwickelt, das sämtliche Raten des Eventfilters in Form von Histogrammen erfasst und an den *Histogram Server* weitergibt, sowie ein Programm, das diese Raten benutzerfreundlich darstellt. Ein erster Vorschlag für die Benutzeroberfläche ist in Abbildung 53 dargestellt.

Des weiteren wird an einem Programm gearbeitet, das die Funktion der Trigger- und Datennahme-Rechner erfasst und graphisch darstellt, um auch deren mögliche Fehlfunktion schnell zu erkennen.

Die Arbeiten am *Data Quality Monitoring* haben gerade erst begonnen. DESY und die Humboldt Universität koordinieren hier die Triggeraspekte.

Schnelle Schauersimulation

Das ATLAS Experiment übertrifft viele frühere Experimente in Größe, Komplexität und Messgenauigkeit. Zur vollen Ausschöpfung des Physikpotentials ist ein genaues Verständnis des Detektors nötig. Eine wichtige Komponente in diesem Erkenntnisprozess ist eine detaillierte Detektorsimulation. Der Simulationsprozess ist in fünf Schritte aufgeteilt. Als erstes werden entweder einzelne Teilchen für Detektorstudien oder physikalische Prozesse generiert. Darauf folgt die Si-

mulation des Detektors, Digitalisierung der simulierten Treffer und die Rekonstruktion der gemessenen Teilchen. Der Zeitbedarf wird durch die reine Detektorsimulation dominiert, die zwischen zehn und fünfzehn Minuten für ein typisches Physikereignis braucht. Im Vergleich zu Planungen aus dem Computing TDR ist dies um einen Faktor vier zu hoch, der bereits davon ausgeht, dass nur für 20% der aufgezeichneten Daten Monte Carlo Daten simuliert werden. Das ATLAS Management hat letztes Jahr eine Task-Force eingesetzt, die die Möglichkeiten der Zeitreduzierung in der vollen Simulation untersuchen soll. DESY und die Universität Hamburg tragen mit zwei Schwerpunkten signifikant zu dieser Task-Force bei: der Entwicklung einer Methode zur Parametrisierung von Elektronenschauern niedriger Energie (*Frozen Showers*) und der Validierung der kombinierten Parametrisierungsstrategie. Studien zum Zeitverbrauch in der Simulation haben gezeigt, dass das elektromagnetische Kalorimeter die Simulationszeit dominiert. Eine Parametrisierung der Schauer von hochenergetischen Elektronen im Kalorimeter sollte einen signifikanten Zeitgewinn bringen. Durch die hohe Materialdichte vor dem Kalorimeter fängt ein Elektronenschauer schon vor dem Kalorimeter an, so dass man im Kalorimeter mit vielen niederenergetischen Elektronen zu tun hat anstatt mit einzelnen hochenergetischen.

Die von DESY vorgeschlagene und umgesetzte Methode der Frozen Showers parametrisiert niederenergetische Elektronen wie folgt: Niederenergetische Elektronen werden separat für diskrete Energie- und Rapiditätswerte simuliert und in einer Bibliothek gespeichert. Während der vollen Simulation werden niederenergetische Elektronen durch Schauer aus der Bibliothek ersetzt, so dass die Simulationszeit verringert wird. Der Schauer aus der Bibliothek muss natürlich der Richtung und Energie des Elektrons angepasst werden. Dieser Ansatz simuliert sehr gut den niederenergetischen Anteil eines Elektronenschauers und gibt einen Zeitgewinn von bis zu zehn für einzelne Elektronen, aber nur einen Faktor zwei für realistische Ereignisse im ATLAS-Detektor.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, zu dem DESY beiträgt, ist die Validierung des Simulationsprozesses sowohl auf Simulations- als auch auf Rekonstruktionsebene.

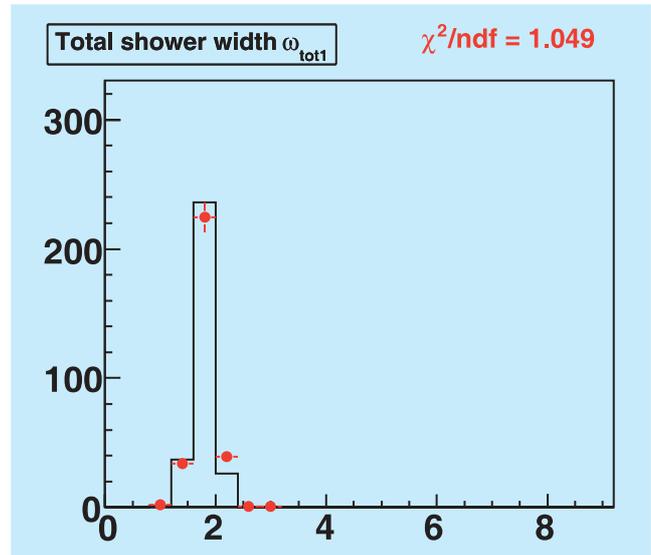


Abbildung 54: Breite eines Schauers in der ersten Lage des Kalorimeters aus der vollen Simulation (schwarze Linie) und der Frozen Shower Methode (rote Punkte).

Auf Simulationsebene kann nicht immer abgeschätzt werden, wie genau eine einzelnen Größe simuliert werden muss. Zum Beispiel ist der Zeitpunkt der einzelnen Treffer für den Simulationsprozess nicht wichtig, spielt aber eine wichtige Rolle während der Digitalisierung der Treffer. Eine falsche oder schlechte Simulation würde so erst auf Rekonstruktionsebene auffallen. Direkte Größen aus der Simulation sind die deponierte Energie in den einzelnen Lagen, die Anzahl der Treffer und die Auflösung in η und ϕ . Auf Rekonstruktionsebene werden Größen wie die rekonstruierte Energie im gesamten Kalorimeter und in den einzelnen Lagen betrachtet, aber auch spezieller Observablen wie die Breite des Schauers in der ersten Lage (Siehe Abbildung 54). Diese Breite ist eine wichtige Observable, um falsch identifizierte Elektronen aus Jets von wahren Elektronen zu unterscheiden. Abbildung 54 zeigt exemplarisch die gute Übereinstimmung der vollen Simulation mit der Frozen Shower Methode.

Genauere Zeitstudien haben gezeigt, dass eine Parametrisierung von Photonen mit niedriger Energie einen weiteren signifikanten Zeitgewinn bringen kann. Die Methode der Frozen Showers ist einer der besten Kandidaten dafür.

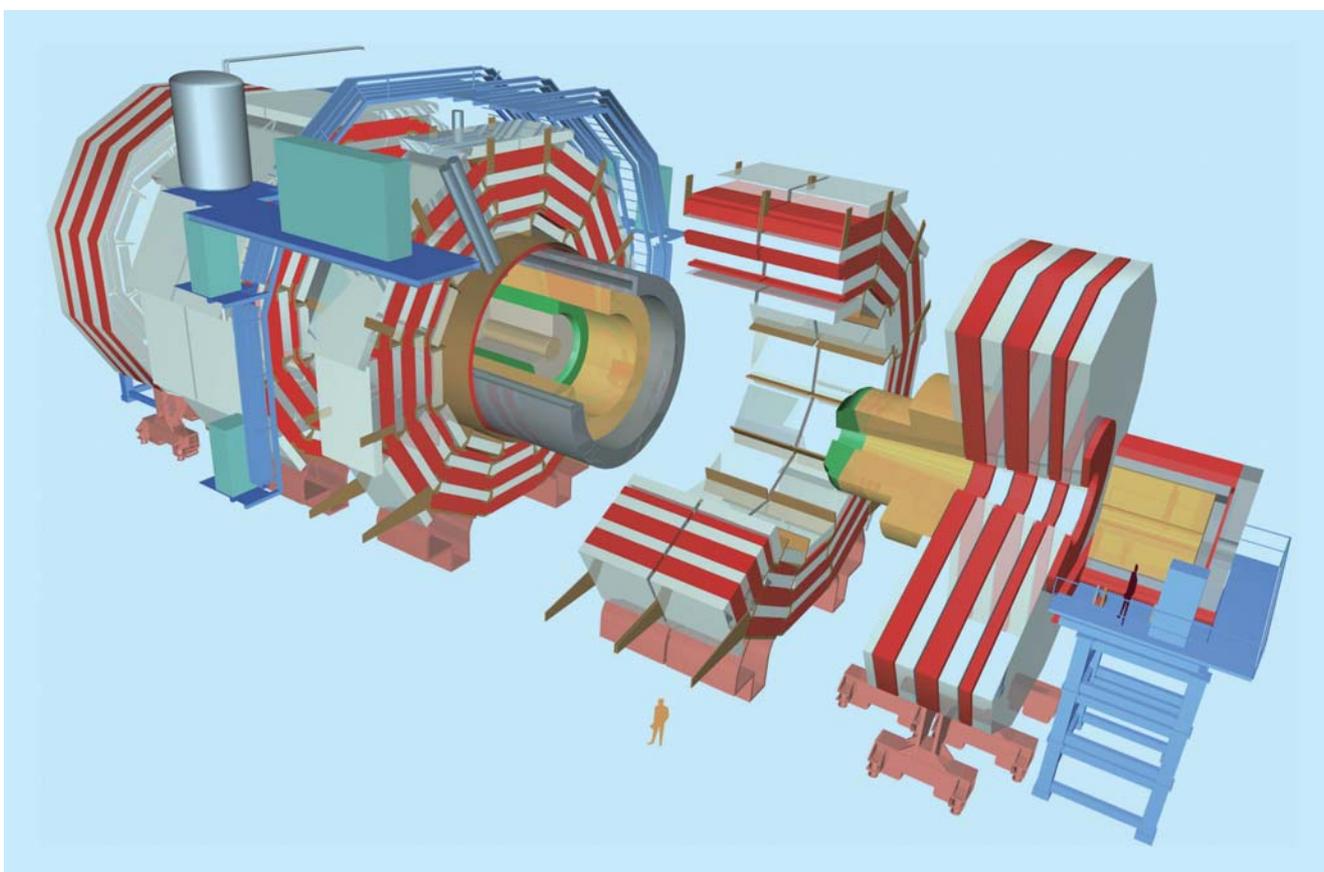


Abbildung 55: Aufbau des CMS-Detektors.

CMS-Experiment

Gruppenleiter: J. Mnich, DESY

Ende 2005 hat das DESY Direktorium beschlossen, dass DESY sich an den beiden großen LHC Experimenten ATLAS und CMS beteiligt. Der Entscheidung vorausgegangen waren intensive Gespräche mit dem Management der Experimente darüber, welche Beiträge DESY leisten kann. Für CMS wurde festgelegt, dass das schon bestehende Engagement im Bereich der Physikanalyse von Standardmodellprozessen weitergeführt wird. Weiter wurde eine Beteiligung am High-Level-Trigger vereinbart. Als weiteres Beteiligungsgebiet wurde die zentrale Technische Koordination von CMS ausgewählt und seit August 2006 arbeitet ein erfahrener DESY-Physiker als Stellvertreter des Technischen Koordinators am CERN. DESY stellte in 2006 einen von zwei Computing Integration Koordinatoren und seit dem 1.1.2007 auch den CMS Computing-Coordinator. Die Projekte, die im Berichtsjahr begonnen wurden werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Technische Koordination

Der CMS-Detektor ist etwa 21 m lang, 18 m hoch, 15 m breit und wiegt 12500 Tonnen. Er besteht aus 15 zylindersymmetrischen Elementen die hintereinander, entlang des Strahls, aufgestellt werden (siehe Abbildung 55). Alle Elemente werden an der Oberfläche montiert und verkabelt und danach als Ganzes in die 100 m unter der Erde liegende Kaverne abgelassen. Dort werden Gas, Kühlung, Stromversorgung und die Glasfasern für die Signale an großen Verteilern an der Seite des Detektors angeschlossen. Die zentralen Teile des elektromagnetischen und hadronischen Kalorime-

ters, sowie der Silizium-Spurdetektor werden in der Untergrundkaverne in den Solenoiden eingebaut.

Die große Herausforderung des Jahres 2006 bestand darin einen Test des Detektors mit Teilen nahezu aller Komponenten an der Oberfläche durchzuführen, den großen 4 Tesla Magneten zu testen und danach mit dem Ablassen der ersten Komponenten zu beginnen. Gleichzeitig musste die Kaverne soweit vorbereitet werden, dass die ersten abgelassenen Komponenten angeschlossen und überprüft werden können. Die erste Hälfte des Jahres stand im Zeichen der Vorbereitung des Magnettests und der ersten Datennahme mit Cosmics (*Magnet Test and Cosmic Challenge* MTCC). Der Magnet war seit Ende Februar auf 4 K abgekühlt und supraleitend. Bis zum Sommer wurden alle Komponenten eingebaut. Im August wurde der Magnet in mehreren Schritten bis auf 3.8 Tesla hochgefahren. Bei diesem Feld wurden Myonen aus der kosmischen Höhenstrahlung mit einem Prototypen des Siliziumtrackers, zwei Supermodulen des elektromagnetischen Kalorimeters, Teilen des hadronischen Kalorimeters und Teilen des Myon-Systems aufgezeichnet. Abbildung 56 zeigt ein Beispiel eines Myons, das in allen Komponenten ein Signal hinterlässt.

Nach dem Ende der Datennahme wurden alle Detektoren aus dem Inneren der Spule entfernt und stattdessen ein Gerät zur präzisen Vermessung des Magnetfeldes eingebaut. Bei verschiedenen Feldstärken wurde das Magnetfeld mit einer Genauigkeit von etwa 10^{-4} vermessen. Dabei wurde der Magnet auch mehrere Tage problemlos mit dem Maximalfeld von 4 Tesla betrieben. Auch während dieser Phase wurden Cosmics genommen, insgesamt hat CMS im Sommer 2006 mehr als

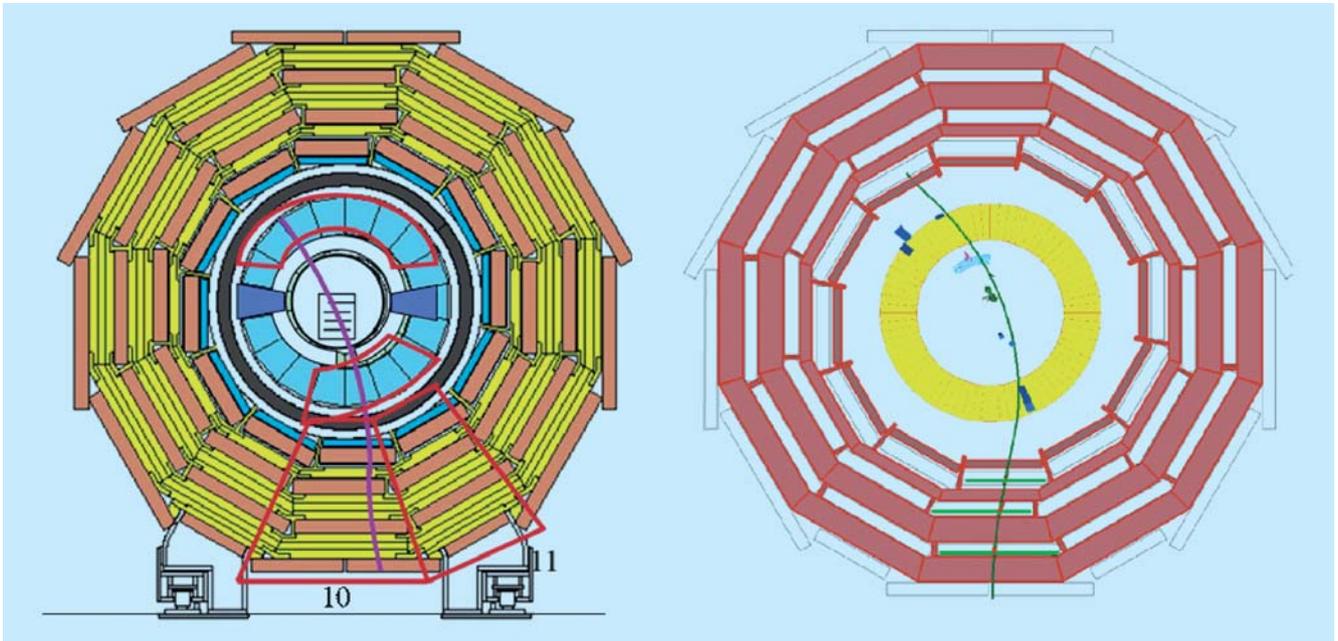


Abbildung 56: *Komponenten des Cosmic Challenge und ein aufgezeichnetes Ereignis.*

230 Millionen Ereignisse aufgezeichnet. Nach Ende des Magnettests wurde der Solenoid aufgewärmt und der Detektor für das Absenken in die Kaverne vorbereitet.

Am 2. November wurde das erste der beiden Hadron-Vorwärtskalorimeter in die Kaverne verbracht. Die zweite Hälfte folgte am 9. November. Am 30. November wurde die erste große Myon-Endkappe (YE+3) in die Detektorhalle abgesenkt und am 12. Dezember folgte die zweite Endkappe (siehe Abbildung 57). Damit ist CMS gut vorbereitet, das zentrale Jochteil mit dem Solenoiden im Februar 2007 in die Untergrundhalle zu bringen.

Die große Herausforderung des Jahres 2007 wird sein, CMS in seiner Anfangskonfiguration bis zum Herbst fertig zu stellen. Besonders schwierig wird dabei die Verlegung der Kabel von allen Detektoren, die innerhalb der Spule sitzen, auf dem Kryostaten. Auf der Außenseite müssen über 5500 Kabel mit einer Gesamtlänge von etwa 200 km verlegt werden. Dazu kommen etwa 20 km Kühlrohre. Die Vorbereitungen für dieses schwierige Projekt laufen auf Hochtouren und gehen wie geplant voran.

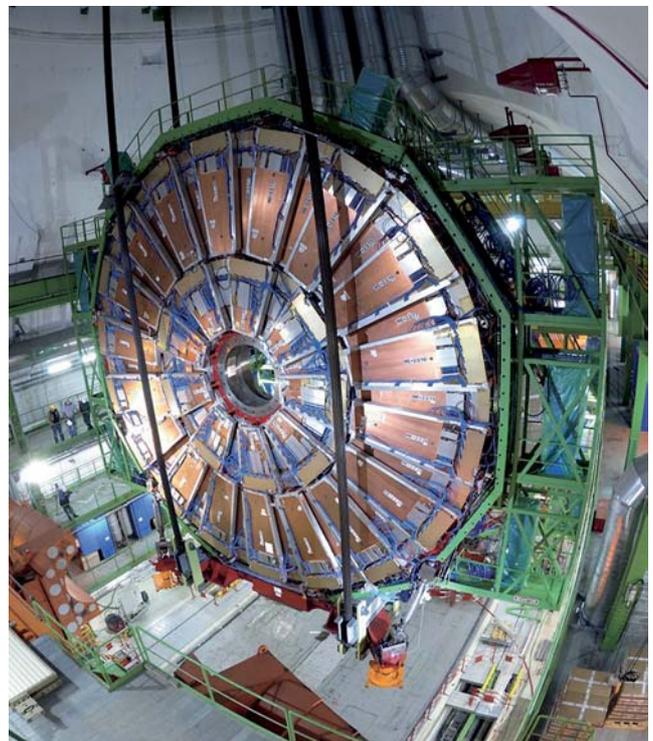


Abbildung 57: *Absenken einer Myon-Endkappe in die Untergrundkaverne.*

High Level Trigger Konfiguration

Am LHC kollidieren die Protonpakete mit einer Rate von 40 MHz. Das CMS Triggersystem besteht aus zwei Stufen. In der ersten Stufe, Level-1 (L1), ist eine schnelle Elektronik implementiert, die ohne Totzeit zu verursachen, arbeitet. Die Triggerentscheidung wird mit einer Latenz von $2.5 \mu\text{s}$ anhand charakteristischer Eigenschaften der Ereignisse getroffen. Während dieser Zeit wird die vollständige digitalisierte Information der Ereignisse zwischengespeichert. Die L1 Triggerentscheidungen werden anhand von groben Informationen aus dem Myon-System und den Kalorimetern getroffen. Der Nachweis von Signalen von Teilchen (Elektronen, Myonen, Jets) mit hohem Transversalimpuls führt zur Auslese der Ereignisinformation. Die Auslese findet über einen Netzwerk-Event-Builder statt, in dem die Teile des Ereignisses aus den verschiedenen Detektorkomponenten zusammengeführt werden. Für die Endausbaustufe ist eine Ausleserate von 100 kHz geplant.

Im *High-Level-Trigger* (HLT) werden die Ereignisse weiter untersucht und gefiltert. Die Filtereinheiten im HLT sind kommerzielle PC Rechenknoten. Die Event-Builder und HLT Systeme sind skalierbar konzipiert. Bei der LHC Design-Luminosität wird die HLT-Farm aus etwa 2000 CPUs bestehen, was bei einer L1-Rate von 100 kHz eine durchschnittliche Verweilzeit im PC von etwa 20 ms bedeutet. Ereignisse werden mit einer Rate von 100 Hz akzeptiert und auf Band geschrieben.

DESY ist an der Entwicklung und Implementierung der Run-Control- und Monitoring-Software des *High Level Trigger Supervisor* (HLTS) beteiligt. Das HLTS-System ist verantwortlich für die Konfiguration der HLT PC Programme (*Filter Units*, FUs). Am Beginn von Runs wird die Konfiguration aus einer Datenbank ausgelesen und zu den FUs weitergeleitet. Außerdem ist das System für die Navigation der FUs durch die definierten State-Transitions, z. B. Aktivieren, Halten, usw., verantwortlich. Zusätzliche HLTS-Aufgaben sind das Auslesen und Summieren von FU Trigger-Statistiken und Herunterladen von Prescale-Werten während der

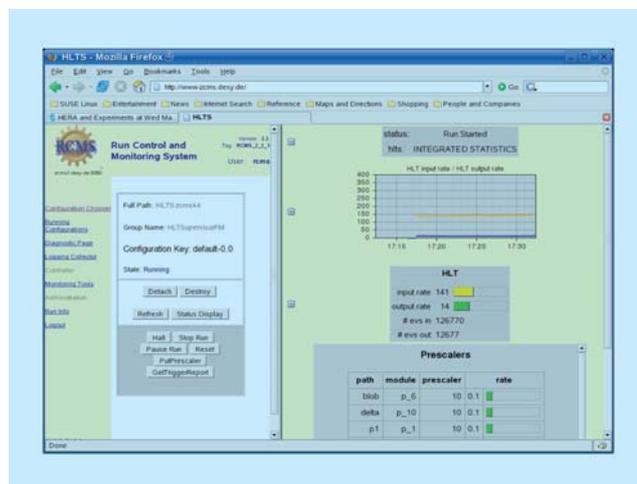


Abbildung 58: Graphische Benutzeroberfläche für die Konfiguration und das Monitoring des High-Level-Trigger Systems.

Runs. Die HLTS-Kontroll-Software ist in Java geschrieben, wobei Web-Services benutzt werden, um Monitoringdaten zu visualisieren. In Abbildung 58 ist die graphische Benutzeroberfläche des HLTS gezeigt. Die Entwicklung der HLTS-Software findet im Allgemeinen auf einem am DESY installierten Testsystem statt. Neue Versionen werden in regelmäßigen Abständen auf den CMS Online-Rechnern am CERN installiert.

Vorbereitung Physikanalyse

Die CMS Gruppe am DESY ist auch aktiv an der Vorbereitung von Physikanalysen beteiligt. Im Juni 2006 hat CMS dem LHC Experiments Committee (LHCC) den zweiten Teil des sogenannten Physics Technical Design Reports vorgelegt, der beruhend auf vollständigen, detaillierten Detektorsimulationen das physikalische Potential des Experiments beschreibt. Der gesamte Bereich der Standardmodellphysik, d. h. QCD und Diffraktion, Top- und b-Physik, sowie elektroschwache Physik, ist von einem DESY-Physiker koordiniert und editiert worden. Außerdem führen drei Doktoranden am DESY vorbereitende Studien zur Top-Physik mit dem CMS-Experiment durch.

Am LHC werden bei der für die ersten Betriebsjahre angestrebten Luminosität von $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ Top-Quarkpaare mit einer Rate von ungefähr einem Ereignis pro Sekunde erzeugt. Damit bietet der LHC ideale Voraussetzungen, um das schwerste der bekannten Teilchen genauer zu untersuchen und noch ungetestete Vorhersagen des Standardmodells zu überprüfen. Insbesondere die Zerfallskanäle mit einem oder zwei geladenen Leptonen sind dafür geeignet.

Eines der am DESY untersuchten Themen ist die Messung der Top-Antitop-Spinkorrelationen, die Aufschluss über den Produktionsmechanismus erlauben. Weil das Top-Quark so kurzlebig ist, dass es zerfällt bevor es in Hadronen fragmentieren kann, ist es das einzige Quark, bei dem eine direkte Spinanalyse möglich ist. Daneben wird die möglichst genaue Messung differentieller Wirkungsquerschnitte studiert. Sowohl Produktion als auch Zerfall von Top-Quarks werden im Standardmodell recht genau vorhergesagt, so dass präzise Messungen zum Beispiel die Überprüfung der Partonverteilungen bei hohen Impulsüberträgen erlauben, aber auch Rückschlüsse auf neue Physik, die sich in manchen Modellen auf Grund der hohen Masse in Top-Endzuständen manifestieren könnte. Darüber hinaus wird am DESY daran gearbeitet, die bisherigen Simulationsergebnisse, die auf Rechnungen in niedrigster Ordnung basieren, durch Studien zu verbessern, die auf vollständig simulierten und rekonstruierten CMS-Ereignissen auf der Basis von neuen Next-to-Leading-Order (NLO) Generatoren beruhen.

Computing

Auch im Bereich des Aufbaus des CMS Computings leistet DESY entscheidende Beiträge. Ein DESY Wissenschaftler war im Jahre 2006 zusammen mit einem Kollegen vom Fermilab mit der Koordination der Computing-Integrationsaufgaben betraut, die dazu dienen, die in den weltweit verteilten Zentren installierten Computing-Ressourcen zu einem homogenen System

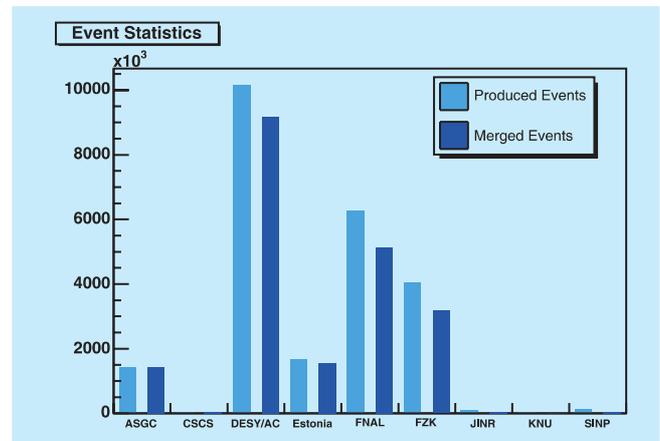


Abbildung 59: Anzahl der von DESY/RWTH Aachen produzierten Events an den verschiedenen Grid-Sites während des CSA06.

zu integrieren. Viele dieser Standorte, darunter auch das DESY Tier-2 Zentrum, stellen heute dank des Integrationsprogramms zuverlässig und mit hoher Leistungsfähigkeit Ressourcen im Bereich Rechenleistung und Speicherkapazität für CMS zur Verfügung. Dieses wurde insbesondere für die Vorbereitungen und die Durchführung des *Computing, Software und Analysis Challenge* (CSA06) ausgiebig genutzt. DESY hat dafür einen hohen Anteil an der Produktion von etwa 65 Millionen Ereignissen erbracht und mit seiner dCache basierten Speicherinstallation über Monate eine stabile und hohe Datentransferrate erzielt.

Ein deutsches Team bestehend aus Studenten von DESY und der RWTH Aachen hat sich sowohl bei der Vorbereitung als auch bei der Durchführung des CSA06 erfolgreich eingebracht und etwa ein Drittel der gesamten Produktion durchgeführt. Zur Aufgabe gehörte es auf dem LHC-Computing-Grid gleichzeitig mehrere tausend Produktionsjobs zu betreuen. Abbildung 59 zeigt die Verteilung der in dieser erfolgreichen Zusammenarbeit auf den verschiedenen Grid-Zentren produzierten CMS-Ereignisse und die wichtige Rolle, die das deutsche CMS Tier-2 Zentrum am DESY und der RWTH Aachen dabei eingenommen hat.

Astroteilchenphysik

Gruppenleiter: S. Schlenstedt

Durch immer vielfältiger werdende Analysen des Spektrums elektromagnetischer Strahlung von Wellenlängen über das sichtbare Licht bis zu höchst-energetischen Gamma-Strahlen wurde in der Astronomie das Verständnis des Universums revolutioniert. Das relativ neue Gebiet der Neutrino-Astrophysik zeigte erste Ergebnisse mit Beobachtungen von Neutrinos von der Sonne und der Supernova 1987a im Energiebereich von keV und MeV. Die Neutrino-Astrophysik für Energien über 100 GeV interessiert sich vorzugsweise für die Neutrinos, die in hochenergetischen astrophysikalischen Prozessen im Zerfall beschleunigter geladener Teilchen in Stoßwellen und starken variablen Magnetfeldern nahe der Quelle entstehen.

Zusätzliche Informationen erhofft man sich durch Kombination der Studien astrophysikalischer Objekte mit unterschiedlichen Botenteilchen (Multi-Messenger). Aus den gleichzeitigen Beobachtungen von elektromagnetischer Strahlung zusammen mit Beobachtungen von Neutrinos erwartet man ein vollständigeres Verständnis der den Objekten zugrunde liegenden physikalischen Prozesse.

Im Jahre 2006 hat eine HGF-Nachwuchsgruppe (*Helmholtz-University Young Investigators Group*) die Astrophysik-Gruppe des DESY verstärkt. Durch die Zusammenarbeit der Nachwuchsgruppe mit der MAGIC-Kollaboration in einem Multi-Messenger-Programm ergibt sich eine neue Thematik am DESY.

Die Suche nach extraterrestrischen Neutrinos erfordert wegen der kleinen Neutrino-Anzahlen und großen Entfernungen zu Objekten wie Doppelsternsystemen oder Aktiven Galaktischen Kernen (AGN)

Neutrino-Detektoren mit sehr großen sensitiven Volumina. Das Schwergewicht der Aktivitäten der Gruppe liegt bei Untersuchungen mit dem noch im Aufbau befindlichen IceCube-Teleskop (und seinem Vorgänger-Experiment AMANDA) sowie dem Neutrino-Teleskop am Südpol. Die Beteiligung am zweiten Experiment NT200+ im sibirischen Baikalsee wird vorraussichtlich 2008 beendet. Diese beiden mit Abstand größten Neutrino-Teleskope ergänzen sich durch ihre geographisch komplementäre Lage und die unterschiedliche Methodik.

IceCube

Status

Der IceCube-Detektor wird aus 4800 Digitalen Optischen Modulen (DOM) bestehen, die an 80 Trossen mit 125 m Abstand zwischen den Trossen und 17 m Abstand zwischen den DOMs entlang einer Trosse aufgehängt werden. Der Detektor im Eis wird ergänzt durch den Luftschauder-Detektor IceTop auf der Eisoberfläche, für den 320 DOMs eingesetzt werden. IceTop besteht aus großen, mit Eis gefüllten Tanks, die jeweils zwei DOMs enthalten und als Stationen paarweise an der Position jeder Trosse aufgestellt sind. IceTop ist völlig in das Trigger- und Datennahmesystem von IceCube integriert.

Im Jahre 2006 waren neun Trossen und 16 IceTop-Stationen installiert. Für den Betrieb im Jahre 2007 wurden weitere 13 Trossen ins Eis eingebracht und 10 Stationen in Betrieb genommen. In den Folgejahren

sollen dann bis zu 16 Trossen und eine entsprechende Stations-Zahl installiert werden. Die Konstruktion des gesamten IceCube-Detektors soll im Jahre 2011 abgeschlossen werden.

Technische Beiträge

Die DESY-Gruppe hat bei der Konstruktion und Inbetriebnahme von IceCube folgende Schwerpunktaufgaben:

- Montage und Test von 1300 DOMs
- Bereitstellung von magnetischen Abschirmungen und von Aufhängungen für 5200 Module
- Entwicklung von Karten für DOR (Digital Optical Module Readout), dem Empfangsteil der DOMs an der Oberfläche
- Koordination und Management der Rekonstruktions-Software
- Rolle als europäisches Zentrum für die Massenprozessierung von experimentellen wie auch von Monte-Carlo-Daten und als deutsches Analysezentrum
- Untersuchung der Möglichkeit, höchstenergetische Neutrinos durch akustische Methoden nachzuweisen

DOM-Produktion Seit der Fertigstellung des Produktions- und Test-Labors im Jahre 2004 werden kontinuierlich optische Module produziert. In vierzehntägigen Zyklen werden im Kühlraum zwischen +20 und -45°C alle DOMs ausführlich getestet. Neben DESY beteiligen sich Gruppen aus Madison (USA) sowie Uppsala und Stockholm (Schweden) an der Modulfertigung. Durch die Einführung einer einheitlichen Technologie für die Herstellung und das Testen der DOMs in allen drei Labors gelang es, gleiche Qualitätsstandards zu sichern. Im Jahre 2006 wurden bei DESY 258 optische Module gefertigt, wovon 224 zum Südpol verschickt wurden. Die gewissenhafte Arbeit der beteiligten Kollegen der AT-Gruppe, der Mechanik, von Experiment-Support und der Werkstätten sowie die

exakte Einhaltung der Technologie führte zu einer Ausfallquote von nur 2%, was für die geplante Produktion von 480 DOMs im Jahre 2007 eine große Bedeutung hat.

DOR-Karte Die digitalisierten DOM-Informationen werden über elektrische Kabel zur DOR-Karte übertragen. Diese Elektronik wurde am DESY entworfen. Am Südpol wurden im Jahre 2006 neun Trossen mit 72 DOR-Karten ausgelesen und neun Karten für die Auslese des IceTop-Detektors verwendet. Für die Datennahme-Saison 2007 wurden 252 DOR-Karten mit verbesserter Firmware produziert, getestet und am Südpol installiert.

Software Die Verantwortlichkeit der DESY-Gruppe auf dem Gebiet der Rekonstruktions-Software besteht in Koordination und Versions-Politik, verstärkt durch eigene Software-Beiträge. Die Software steht der Kollaboration für die Daten-Rekonstruktion und die Analyse zur Verfügung. Die erste Online-Version wurde für die Datennahme des Jahres 2006 am Pol installiert, eine erweiterte Version kommt in diesem Jahr zum Einsatz.

Computing Auf den Rechnern des Batch-Clusters des DESY Zeuthen wurden neben AMANDA-Rekonstruktions- und Simulationsaufgaben auch IceCube-Simulationsrechnungen für die Kollaboration ausgeführt. Es wurden Signal- und Untergrund-Ereignisse für verschiedene Detektor-Konfigurationen generiert, wobei der AMANDA-Detektor berücksichtigt wurde. Eine weitere Aktivität ist die Vorbereitungen des Zugriffs auf die Daten sowie Simulations-Produktion mit Hilfe von GRID-Tools. Diese Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit der IT-Gruppe ausgeführt.

Akustischer Neutrino-Nachweis Die Untersuchungen und Entwicklungen wurden 2006 bei DESY fortgesetzt. Erste Messungen zur Abklinglänge akustischer Signale und eventueller Stör-Geräusche im Eis sollen 2007 mit SPATS (*South Pole Acoustic Test Setup*) durchgeführt werden. An diesem Projekt sind neben DESY Gruppen aus Berkeley, Gent, Stockholm und Uppsala beteiligt. SPATS besteht aus drei 400 m langen Trossen mit je sieben akustischen Stationen aus

einem Sender und drei Empfängern, die alle bei DESY entwickelt, gebaut und getestet wurden. Im März 2006 fand in Zeuthen ein Systemtest des gesamten Setups statt. Ende April wurden die Eigenschaften der sensitiven Komponenten in einem See in Nordschweden bei großen Abständen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass SPATS-Transmitter Signale aussenden, die nach mehr als einem Kilometer Entfernung von SPATS Receivern im Wasser registriert werden. Im Eis werden noch bessere Resultate erwartet. Zur Steuerung der Datennahme wurde ein PCI-Businterface entwickelt und gefertigt. Im Herbst wurde das Setup nach nochmaliger Prüfung von Hard- und Software verpackt und zum Südpol geschickt. Im Januar 2007 konnte es dort erfolgreich installiert und in Betrieb genommen werden.

Physikalische Untersuchungen mit IceCube und AMANDA

Der AMANDA-II-Detektor besteht aus 19 Trossen und nimmt seit dem Jahr 2000 kontinuierlich Daten. AMANDA ist seit diesem Jahr vollständig (topologisch und durch die Datenverarbeitung) in IceCube integriert. Der IceCube-Detektor besteht im Moment aus 22 Trossen, die in den letzten drei Jahren ins Eis eingebracht wurden. Erste physikalische Analysen der IceCube-Daten haben begonnen und werden in Kürze publiziert.

AMANDA-II hat eine effektive Fläche von 25000 m² für 1-TeV-Myonen und ist damit etwa 25 mal sensitiver als die größten unterirdischen Neutrino-Detektoren. Vorhersagen für die Neutrino-Flüsse aus astrophysikalischen Objekten wie aktiven galaktischen Kernen oder Gamma Ray Bursts legen für deren Nachweis Detektoren von der Größenordnung eines Kubikkilometers nahe. Mit IceCube wird die Sensitivität, je nach physikalischer Fragestellung, um einen Faktor 30-100 gegenüber AMANDA verbessert.

Im Jahr 2006 wurde in Zeuthen das Prozessieren aller Daten, die in den Jahren 2000–2004 mit AMANDA aufgezeichnet wurden, abgeschlossen. Diese Daten dienen als Standard-Datensatz für die Analysen der Kolla-

boration. Er erlaubt neben der in Zeuthen durchgeführten Suche nach Punktquellen und der Suche nach einem diffus einfallenden Fluss hochenergetischer Neutrinos auch eine Vielzahl von anderen Analysen. Dazu zählen das Studium von in der Atmosphäre erzeugten Neutrinos und die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie in Inneren der Erde und der Sonne.

Suche nach Punktquellen

Eines der zentralen Analyse-Themen der Gruppe ist die Suche nach Punktquellen kosmischer Neutrinos mit dem AMANDA-II-Detektor und IceCube. Das oben erwähnte gereinigte und gefilterte Datenmaterial der Jahre 2000–2004 umfasst 4282 Ereignisse. Das sind Myonen, die den Detektor von unten durchqueren und von Neutrinos erzeugt wurden, die aus der nördlichen Hemisphäre kommen. Abbildung 60 zeigt eine Himmelskarte dieser Neutrino-Ereignisse. Diese Ereignisse sind jedoch wahrscheinlich fast alle nicht im Kosmos, sondern bei den Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre entstanden. Eine Punktquelle wäre als eine lokale Konzentration von Ereignissen in dieser Karte sichtbar. Da keine signifikante Konzentration entdeckt wurden, konnten nur obere Schranken für erlaubte Neutrino-Flüsse von kosmischen Objekten, die am Nordhimmel sichtbar sind, angegeben werden. Diese Flussgrenzen schränken theoretische Vorhersagen über die Neutrino-Produktion in ausgewählten Objekten bereits erheblich ein. Zurzeit wird diese Suche nach Punktquellen auf mögliche Quellen hochenergetischer Neutrinos am Südhimmel ausgedehnt.

Das Multi-Messenger Programm

Bei der Beobachtung elektromagnetischer Strahlung konzentriert sich die Helmholtz-Nachwuchsgruppe vor allem auf sehr hochenergetische Gamma-Strahlung (GeV/TeV), die mit Hilfe von Cherenkov-Teleskopen erstmals 1989 nachgewiesen wurde. Durch die Kombination von Gamma-Daten der letzten Jahre mit Neutrino-Beobachtungen kann die Nachweiswahrschein-

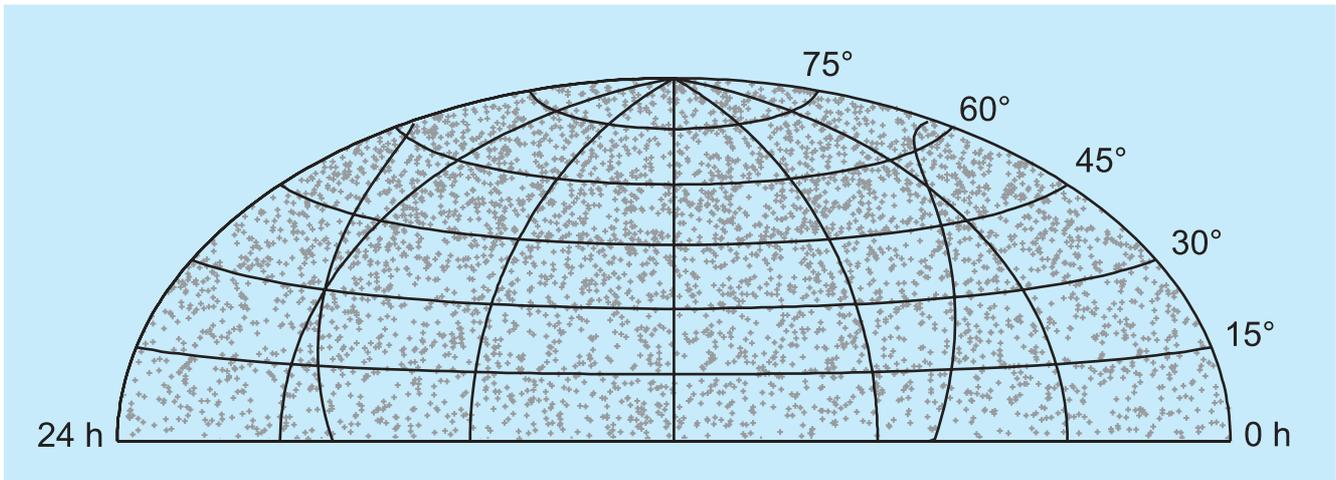


Abbildung 60: Himmelskarte mit AMANDA-II gemessener Neutrino-Ereignisse (2000–2004).

lichkeit für Neutrino-Signale erhöht und das Verständnis kosmischer Objekte verbessert werden.

Da Cherenkov-Teleskope ein sehr eingeschränktes Gesichtsfeld haben, existieren jedoch oft keine Beobachtungen von GeV/TeV-Photonen zeitnah zu gemessenen Neutrino-Ereignissen. Aus diesem Grund wurde zusammen mit der MAGIC-Kollaboration ein Target-of-Opportunity (ToO) Programm entwickelt. Wenn AMANDA ein Neutrino aus einer Richtung detektiert, in welcher sich ein vorab definierter Quellkandidat befindet, wird ein Alarm an MAGIC gesendet. Das Cherenkov-Teleskop versucht dann eine Beobachtung der Quelle durchzuführen, falls Sichtbarkeit und Wetter dies zulassen. Ein technischer Test des ToO-Systems mit AMANDA wurde von September bis Dezember 2006 erfolgreich durchgeführt. In den nächsten Monaten wird es für den IceCube Detektor angepasst und optimiert werden.

Gerade im Bereich der GeV/TeV- γ -Astronomie wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt. Neben zahlreichen anderen Ergebnissen steht heute eine große Datenmenge von Beobachtungen von AGNs zur Verfügung. Die Nachwuchsgruppe arbeitet an einem Archiv für historische und aktuelle Beobachtungen von GeV/TeV- γ -Strahlen sowie an der Kombination und Auswertung der archivierten Datensätze. In Abbildung 61 ist eine aus den archivierten Daten er-

zeugte Lichtkurve des prominenten BL-Lac-Objektes Markarian-421 dargestellt. Dieser Datensatz ist in seiner Vollständigkeit unübertroffen.

Suche nach diffusen Quellen

Bestimmte Neutrino-Wechselwirkungen können isolierte elektromagnetische und hadronische Schauer (Kaskaden) erzeugen. Die Analyse solcher Endzustände hat verschiedene Vorteile: eine gute Energieauflösung, mit der man das härtere astrophysikalische Spektrum vom atmosphärischen Spektrum unterscheiden kann, und einen niedrigeren Untergrund von anderen Wechselwirkungen. Durch den niedrigeren Untergrund hat man eine größere geometrische Akzeptanz als in der Punktquellen-Suche.

Nach diesem physikalischen Endzustand wird erstmalig im AMANDA-Datensatz der Jahre 2000–2004 gesucht, der in Zeuthen prozessiert worden ist. Der Datensatz ist fünfmal größer als in vorherigen Kaskaden-Analysen, sodass man eine entsprechend höhere Sensitivität erreichen kann.

Mit dem 1-km³-Volumen des IceCube-Detektors kann man hochenergetische Neutrinos mit Energien über 10¹⁷ eV beobachten. Bei diesen Energien werden Bremsstrahlung und Paar-Erzeugung durch den Landau-

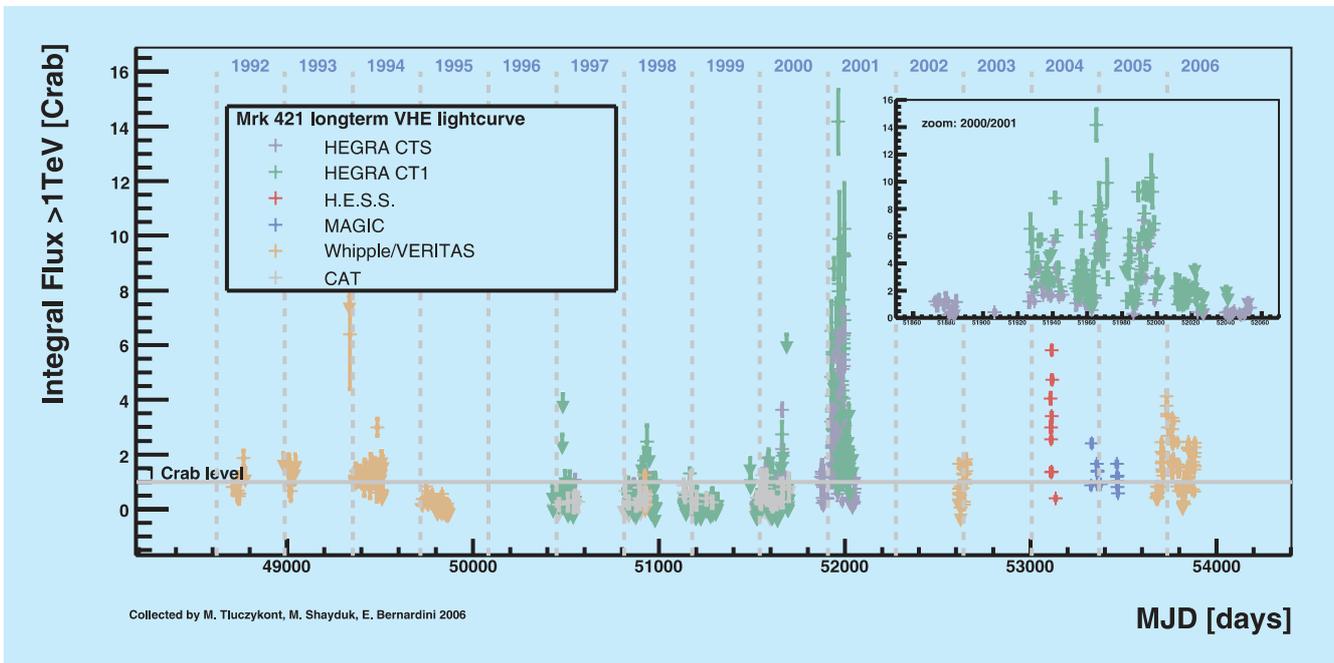


Abbildung 61: Lichtkurve des BL-Lac-Objektes Markarian-421 aus Daten der letzten 15 Jahre.

Pomeranchuk-Migdal (LPM) Effekt unterdrückt. Daher sind die Kaskaden von Elektron- oder Tau-Neutrinos bis zu mehreren 100 m lang. Die Analyse, die sich mit diesen Daten beschäftigt, schließt Kaskadensimulation basierend auf einer Parametrisierung des longitudinalen Energieverlustes und Simulationsrechnungen im LPM-Regime und neue Informationen über die Eis-Eigenschaften ein. Das Ziel ist eine verbesserte Richtungsrekonstruktion für Kaskaden-Ereignisse und damit eine Punktquellen-Suche bei höchsten Energien.

Analyse von kosmischen Strahlung

Mit IceTop soll das Energiespektrum der geladenen kosmischen Strahlung oberhalb von etwa $3 \cdot 10^{14}$ eV gemessen werden. Die interessanteste Fragestellung ist die Bestimmung der Beiträge von Kernen verschiedener Massen unter den Primärteilchen. Die experimentellen Aussagen zu dieser so genannten chemischen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung sind bisher noch sehr unsicher. Mit der Möglichkeit, die Luftschauer

in Koinzidenz mit hochenergetischen Myonen im Eis nachzuweisen, eröffnet IceTop einen Erfolg versprechenden Zugang.

Die wichtigsten Arbeiten bei DESY waren die Entwicklung eines Algorithmus für die Rekonstruktion und Energiebestimmung von Luftschauern und ein Kalibrationsalgorithmus für die gemessenen Signale in den IceTop Tanks. Die DESY-Gruppe entwickelte dazu eine neue Parametrisierung der lateralen Energieverteilung eines Schauers. Für die genaue Anpassung dieser Funktion an die gemessenen Tanksignale und um daraus Energie und Richtung des Schauers zu bestimmen, ist die Kenntnis der Verteilungen der Fluktuationen notwendig. Die Anwendung auf die Daten lieferte erste Ergebnisse für ein Energiespektrum, was dann mit den Daten des größeren Detektors in 2007 zu der ersten Publikation physikalischer Ergebnisse von IceTop führen soll.

Ein weiterer wichtiger Beitrag der DESY-Gruppe war die Entwicklung eines robusten Kalibrationsalgorithmus für die Tanksignale, ausgedrückt durch das mittlere Signal eines vertikal einfallenden Myons im Tank.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch ein besseres Verständnis der verschiedenen Beiträge zur Form des Signalspektrums erreicht. Das vorgeschlagene Kalibrationsverfahren ist von der IceTop-Arbeitsgruppe als Standard akzeptiert worden.

Das Baikal-Experiment

Das Baikal-Experiment ist das Pionier-Experiment für die Messung hochenergetischer Neutrinos. Es wurde 1998 als NT200 mit 192 Photoröhren (PM) an 8 Trossen in Betrieb genommen. Anfang 2005 wurde die Anlage um drei Trossen zum viermal empfindlicheren Teleskop NT200+ erweitert.

Die geringe Lichtstreuung im Baikalsee ermöglicht die Suche nach Kaskaden unterhalb des Detektors in einem sehr großen Volumen. Die im Jahr 2006 publizierte obere Grenze für den Fluss hochenergetischer, diffus eintreffender Neutrinos aus den Daten der Jahre 1998–2002 ist in guter Übereinstimmung mit dem von AMANDA publizierten Limit. Mit NT200 wurde außerdem die niedrigste Grenze für den Fluss re-

lativistischer magnetischer Monopole bestimmt und ein neues, konkurrenzfähiges Limit für den indirekten Nachweis für die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie erhalten. Die Arbeiten bei DESY konzentrieren sich auf die Suche nach Neutrinos, die von einem massiven Lichtausbruch des Soft-Gamma-Repeater 1806-20 stammen.

DESY hat eine Linux-PC basierte, 100 mal schnellere Daten-Verbindung vom Ufer zum Unterwasser-Teleskop NT200+ entwickelt, sowie einen Unterwasser-Lasermodul beigesteuert, der mit Nanosekunden-Lichtpulsen eine synchrone Eichung des Teleskops mit einer einzigen Lichtquelle erlaubt. Schließlich wurde mit Hilfe von DESY die Satelliten-Kommunikation zwischen dem Uferzentrum und Europa durch Installation einer Breitband-Verbindung verbessert und überwacht.

Im Tunka-Tal nahe dem Baikalsee wurde der erste von 19 Clustern des Luftschauerdetektors Tunka-133 installiert. Das Experiment wird von DESY und dem FZK unterstützt. Daten von Tunka-133 werden komplementäre Informationen zu KASCADE-Grande und IceTop liefern.

Theoretische Physik

Gruppenleiter: F. Schrempp (Hamburg), T. Riemann (Zeuthen), K. Jansen (NIC)

Die Forschungsfelder der Theorie-Gruppen in Hamburg und Zeuthen, in enger Vernetzung mit den Instituten für Theoretische Physik der Universität Hamburg und der Humboldt-Universität zu Berlin, behandeln die wesentlichen Themata der modernen Teilchenphysik.

Durch die Hamburger Aktivitäten wird ein breites Spektrum abgedeckt: von der Phänomenologie im Rahmen des Standardmodells und seinen möglichen Erweiterungen, über die Teilchen-Kosmologie, bis zur Stringtheorie und mathematischen Physik.

In Zeuthen liegen die Schwerpunkte bei Präzisionsuntersuchungen für die Beschleuniger HERA, LHC und ILC sowie in der Gittereichtheorie, einschließlich der Entwicklung von Parallelrechnern. Letzteres profitiert von der engen Zusammenarbeit mit dem John von Neumann-Institut.

im Proton extrahiert. Die Abhängigkeit der exklusiven Wirkungsquerschnitte vom Impuls des gestreuten Protons erlaubte es dabei insbesondere, das Zusammenspiel von longitudinalem Impuls und transversalem Dichteprofil der Gluonen zu untersuchen.

Komplementäre Information zur dreidimensionalen Hadronstruktur kann in Gittersimulationen gewonnen werden. In Erweiterung früherer Arbeiten wurde in [DESY 06-135] der elektromagnetische Formfaktor des Pions berechnet, wobei umfangreiche Studien zur Kontrolle von Gitterartefakten durchgeführt wurden. Ein wesentlicher Aspekt bei der Auswertung von Gitterrechnungen ist die Extrapolation zum physikalischen Wert der Quarkmassen, die mithilfe der chiralen Störungstheorie durchgeführt werden kann. In [DESY 06-123, 196] wurde die Quarkmassenabhängigkeit in der Ein-Schleifen Näherung berechnet für eine weite Klasse von Proton-Matrixelementen, die in laufenden Gittersimulationen untersucht werden.

Aktivitäten in Hamburg

HERA-Physik und QCD

Hadronstruktur

Aus einer Vielzahl von Streuprozessen bei HERA können detaillierte Erkenntnisse über die Struktur des Protons gewonnen werden. In [DESY 06-095] wurde in einer kombinierten Analyse von Daten zum inklusiven Streuquerschnitt und einer Reihe von exklusiven Endzuständen die dreidimensionale Gluonverteilung

Inklusive Teilchenproduktion

Die inklusive Teilchenproduktion erlaubt das Studium einer Vielzahl von Aspekten der starken Wechselwirkung. In [DESY 06-204] wurde eine systematische Berechnung durchgeführt für Polarisationsobservable der tiefinelastischen Streuung, aus denen detaillierte Information zur Verteilung der Quarkpolarisation im Nukleon extrahiert werden kann. Dabei wurde sowohl die führende als auch die nächstführende Ordnung in der Photonvirtualität Q berücksichtigt. Für bestimmte Spineffekte bietet die kohärente Produktion eines Hadron-Paares vielversprechende Möglichkei-

ten für experimentelle Studien, insbesondere auch bei HERMES. Ein Modell für die dabei auftretenden Di-Hadron-Fragmentationsfunktionen wurde in [DESY 06-119] entwickelt.

Der inklusive Wirkungsquerschnitt für die Elektroproduktion einzelner leichter Hadronen wurde zu nächstführender Ordnung in der starken Kopplung α_s unter Verwendung von Fragmentationsfunktionen berechnet, die kürzlich durch einen globalen Fit an Daten der e^+e^- -Vernichtung gewonnen wurden [DESY 05-022]. Der Vergleich dieser Rechnungen mit Daten der H1- und der ZEUS-Kollaboration ergab für hinreichend große Werte der Photonvirtualität Q gute Übereinstimmung. Abweichungen, die bei kleinen Werten von Q oder des normierten Hadronimpulses x_p auftraten, konnten durch die Berücksichtigung von Masseneffekten der detektierten Hadronen verringert werden [DESY 06-197].

Der sogenannte DGLAP-Formalismus für masselose Teilchen kann auch auf schwere Hadronen, etwa D- oder B-Mesonen, angewandt werden, sofern deren Masse klein ist gegenüber der charakteristischen Skala des betrachteten Prozesses (z. B. der Schwerpunktsenergie in der e^+e^- -Vernichtung). So wurden nichtstörungstheoretische Fragmentationsfunktionen für D^0 -, D^+ - und D_s^+ -Mesonen sowie für Λ_c^+ -Baryonen durch Fits an entsprechende LEP1-Daten der OPAL-Kollaboration bestimmt. Mit diesen Funktionen können auch Daten von anderen e^+e^- Experimenten (CLEO, HSR und TASSO) erfolgreich beschrieben werden, was einen nichttrivialen Test der Skalenverletzung darstellt [DESY 06-102].

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD sagt die Existenz sogenannter Farboktettprozesse in der Natur vorher, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen im harten Subprozess nicht neutralisiert werden. Die gemeinsame Erzeugung prompter J/ψ -Mesonen und isolierter harter Photonen in der tiefinelastischen Streuung wurde in [DESY 06-136] als vielversprechende Nachweismöglichkeit des Farboktettmechanismus bei HERA identifiziert.

Vielschleifen-Korrekturen

Kürzlich ist eine neue Methode zur Berechnung einer großen Klasse von Feynman-Diagrammen mit mehreren Quantenschleifen vorgeschlagen worden, die auf einer zweckmäßigen Parametrisierung gewisser Einschleifen-Unterdiagramme beruht [DESY 05-153]. Mit Hilfe dieser Methode wurden massive Vierschleifen-Diagramme mit sogenannter Tadpole-Topologie berechnet und damit analytische Ausdrücke gewonnen für die durch ein schweres Quark induzierte Vakuum-polarisation der QCD [DESY 06-073], sowie für die Anpassbedingung der starken Kopplungskonstante an den Quarkschwellen [DESY 06-074]. Ferner wurden die für die Einbettung der nichtrelativistischen QCD in die relativistische Theorie benötigten Anpassungskoeffizienten des Vektor-, Axialvektor-, Skalar- und Pseudoskalarstroms zu zwei Schleifen berechnet. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Farbsingulettdiagramme gerichtet [DESY 06-031].

Top-Quark Produktion

Die H1-Kollaboration beobachtete in den HERA I Daten einen unerwarteten Überschuss an Ereignissen mit isolierten Leptonen und fehlendem Transversalimpuls, und zwar besonders bei großen Werten des hadronischen Transversalimpulses – eine für die Erzeugung einzelner Top-Quarks typische Signatur. Diese Beobachtung wird durch HERA II bestätigt und motivierte die Berechnung der Wirkungsquerschnitte für die Photo- und Elektroproduktion einzelner Top-Quarks im Rahmen des Standardmodells und seiner minimalen supersymmetrischen Erweiterung (MSSM), wobei im letzteren Falle sowohl minimale als auch nichtminimale Szenarien der Flavour-Verletzung betrachtet wurden [DESY 06-041].

Vielfachstreuung bei hohen Energien

Das Phänomen der Vielfachstreuung (*multiple interactions*) in einem einzelnen Ereignis ist seit längerer Zeit

sowohl bei HERA als auch am Tevatron intensiv untersucht worden und wird am LHC eine bedeutende Rolle spielen. Bei HERA ist Vielfachstreuung insbesondere in der Photoproduktion von Multi-Jet Endzuständen nachgewiesen, und die Beobachtung von harten diffraktiven Endzuständen stellt ebenfalls einen indirekten Existenzbeweis dar. In einem Beitrag zu [DESY 06-052] wurden theoretische Aspekte der Vielfachstreuung beschrieben, wobei insbesondere die Rolle von Farbkorrelationen zwischen den verschiedenen Partonkaskaden diskutiert wurde.

Ein theoretischer Zugang zum Verständnis der Vielfachstreuung in der Störungstheorie basiert auf der Verwendung des Pomerons als kollektivem Freiheitsgrad, der aus Gluonen konstruiert ist. Die Wechselwirkung von Pomeronen kann durch eine effektive Feldtheorie beschrieben werden. In [hep-ph/0605185] wurden die klassischen Feldgleichungen dieser Theorie gelöst und damit die komplette Information über das Verhalten von Streuamplituden in der semi-klassischen Näherung zugänglich gemacht. Eine vereinfachte Version dieser Theorie, in der die Zahl der transversalen Dimensionen von zwei auf null gesetzt wird, wurde in [DESY 06-167] untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Energieabhängigkeit des Pomeron-Austausches erhalten werden kann aus der Analogie dieser Theorie mit Reaktions-Diffusions-Gleichungen, die in der Statistischen Physik ausführlich studiert worden sind.

Eng verwandt mit dem Phänomen der Vielfachstreuung sind hadronische Rückstreu-Effekte. Diese sind insbesondere verantwortlich für die in bestimmten Reaktionen beobachtete Brechung der Faktorisierung, d. h. der Darstellung des Wirkungsquerschnitts durch einen harten Streuprozess und geeignete Partondichten. In [DESY 06-124] wurde diese Faktorisierungsbrechung quantifiziert für die bei HERA gemessene Produktion eines Jet-Paares in Verbindung mit einem schnellen Neutron im Endzustand.

Instantonprozesse

Ein grundlegender nicht-störungstheoretischer Aspekt der Quantenchromodynamik ist ihre komplexe Vaku-

umstruktur, wobei Instantonen wichtige, topologisch nichttriviale Bausteine darstellen. Trotz zahlreicher, überzeugender theoretischer Hinweise auf die Existenz und tiefe Bedeutung von Instantonen steht ihr direkter experimenteller Nachweis aber noch immer aus. Möglicherweise lässt sich die beobachtete drastische Verletzung der sogenannten Lam-Tung-Beziehung zwischen Koeffizientenfunktionen der Winkelverteilung von Leptonpaaren in Hadron-Hadron-Kollisionen durch Instanton-induzierte Beiträge erklären [DESY 06-069]. Die wichtige Frage nach der Beobachtbarkeit von Instanton-induzierten Prozessen bei LHC wurde in 2006 systematisch weiterverfolgt [hep-ph/0601012]. Als Ausgangspunkt der Berechnungen fuer LHC im Rahmen der Instanton-Störungstheorie dienten einerseits die in der Theoriegruppe erzielten rigorosen Ergebnissen über Raten und Signatur von Instanton-Prozessen bei HERA. Andererseits flossen die Erfahrungen von zwei auf den theoretischen Voraussagen aufbauenden HERA-Experimenten zur Instantonsuche ein. Anders als bei HERA ist der führende Subprozess bei LHC durch zwei Gluonen initiiert. Die für die Anwendung der Instanton-Störungstheorie notwendige Virtualität wird z. B. durch ein W-Boson im Endzustand eingebracht. Sie ist daher bei LHC zeitartig. Letzteres erschwerte die notwendige Gluonresummation im Endzustand erheblich. Dennoch wurde ein sehr enger Zusammenhang (Crossing) zur (raumartigen) Instantondynamik bei HERA gefunden. Die resultierenden Raten wurden mit entsprechenden Berechnungen im Rahmen der üblichen Störungstheorie verglichen und geben zu Optimismus Anlass. Zusätzlich verstärkt die hohe Zahl von Endzustandsgluonen bei LHC den erwarteten „Feuerball-Charakter“ der Instanton-Ereignisse erheblich im Vergleich zu HERA.

Gittereichtheorie

Im Bereich Gittereichtheorie konzentrierten sich die Aktivitäten auf die Physik der K- und B-Mesonen sowie die Berechnung der relativistischen Korrekturen zum statischen Quarkpotenzial.

$K \rightarrow \pi\pi$ Zerfälle und die $\Delta I = 1/2$ Regel

Ein wesentlicher Bestandteil der Aktivitäten war die Untersuchung der Ursachen der $\Delta I = 1/2$ Regel in $K \rightarrow \pi\pi$ Zerfällen. Durch den Vergleich der Übergangsamplituden für den Fall eines unphysikalisch leichten Charm-Quarks ($m_c = m_u$) mit der physikalischen Situation sollte insbesondere die Frage untersucht werden, ob die große Masse des Charm-Quarks den Zerfall in den $\pi\pi$ -Endzustand mit Isospin 0 begünstigt. Die Zerfallsamplituden für $K \rightarrow \pi\pi$ lassen sich durch effektive Kopplungskonstanten der chiralen Störungstheorie ausdrücken, die in der Gittersimulation für den Fall $m_u = m_c$ berechnet wurden [DESY 06-070]. Ein wesentliches Element des Projekts war die Verwendung einer fermionischen Diskretisierung mit exakter chiraler Symmetrie, wodurch keine Mischung mit Operatoren verschiedener Chiralität auftritt und die schwierige nicht-perturbative Subtraktion von Operatoren niedriger Dimensionen völlig vermieden werden kann. Durch die Verwendung spezieller numerischer Verfahren gelang es zudem zum ersten Mal, die relevanten 3-Punkt-Korrelationsfunktionen im sogenannten ε -Regime der QCD mit kontrollierten statistischen Fehlern zu berechnen. Die effektiven Kopplungskonstanten wurden durch geeignete Fits an die Simulationsdaten im ε -Regime und p -Regime bestimmt, wodurch die üblichen systematischen Effekte aufgrund langer chiraler Extrapolationen vermieden werden konnten. Für den Fall $m_c = m_u$ ergeben die Resultate signifikante nicht-perturbative Beiträge zur $\Delta I = 1/2$ Regel, können jedoch den experimentell beobachteten Wert quantitativ nicht erklären. Dies liefert einen indirekten Hinweis auf die Wichtigkeit des Charm-Quarks für die $\Delta I = 1/2$ Regel, die künftig direkt bestätigt werden soll.

Renormierung von Vier-Quarkoperatoren

Im Standardmodell führt die Operatorproduktentwicklung der effektiven schwachen Wechselwirkung auf diverse Vier-Quarkoperatoren. Beispiele hierfür sind die $\Delta B = 2$ Operatoren, die Oszillationen neutraler

B-Mesonen beschreiben, aber auch die $\Delta S = 1$ Operatoren, die für die Untersuchung der $\Delta I = 1/2$ Regel relevant sind. Die Berechnung ihrer hadronischen Matrixelemente durch Simulationen der Gitter-QCD mit Wilson-Quarks erzeugt zusätzliche Counter-Terme aufgrund der expliziten Brechung der chiralen Symmetrie. Eine besondere technische Schwierigkeit bei $\Delta S = 1$ Operatoren ist die Mischung mit Operatoren niedriger Dimension, was eine nicht-perturbative Berechnung der entsprechenden potenz-divergenten Koeffizienten erfordert. In unseren Projekten wurden zwei unterschiedliche Methoden zur Lösung des Problems der Operatormischung untersucht.

Für $\Delta B = 2$ Übergänge kann die Mischung mit Vier-Quarkoperatoren gleicher Dimension im Rahmen der sogenannten *twisted mass QCD* vermieden werden, welche eine exakte Abbildung der phänomenologisch relevanten, paritätserhaltenden Operatoren auf entsprechende paritätsverletzende Operatoren erlaubt. In [DESY 06-030] wurde gezeigt, dass letztere ausschließlich multiplikativ renormiert werden, wobei das schwere Quark in der statischen Näherung betrachtet wurde. Das Schrödingerfunktional der QCD ermöglicht überdies die Definition einer Familie von Renormierungsschemata im endlichen Volumen für die relevanten Operatoren zur Beschreibung der Mischung von B-Mesonen. Diese Arbeit bildet die Grundlage für die laufende nicht-perturbative Berechnung der skalenabhängigen Renormierung dieser Operatoren, sowohl in der *quenched* Approximation, als auch für zwei dynamische Quark-Flavours.

Das noch schwierigere Mischungsproblem der Vier-Quarkoperatoren zur Beschreibung von $\Delta S = 1$ Übergängen kann durch die Verwendung einer fermionischen Diskretisierung mit exakter chiraler Symmetrie im Fall $m_c = m_u$ gelöst werden. Die technische Schwierigkeit einer nicht-perturbativen Berechnung der multiplikativen Renormierungsfaktoren besteht dann in der Formulierung der speziellen Randbedingungen des Schrödingerfunktionals für eine entsprechende Gitter-Wirkung. In [DESY 06-112] wurde hierzu auf eine früher entwickelte Strategie zurückgegriffen, die auf der Einführung eines weiteren intermediären Schemas beruht. Die nicht-perturbativ berechneten Werte der

Renormierungsfaktoren wurden für die Bestimmung der effektiven Kopplungskonstanten in [DESY 06-070] herangezogen.

Relativistische Korrekturen zum statischen Quark-Potenzial

Im Rahmen der sogenannten *Potential non-relativistic QCD* (pNRQCD) zur Beschreibung von Quarkoniumzuständen wird das Interquark-Potenzial nach Potenzen von $1/m$ entwickelt, wobei m die Quarkmasse bezeichnet. Das statische Potenzial tritt hierbei in führender Ordnung auf, gefolgt von relativistischen Korrekturen. Diese können in der pNRQCD nicht-perturbativ definiert und durch Korrelationsfunktionen des Feldstärkeoperators mit statischen Quell-Feldern ausgedrückt werden. Durch die Entwicklung neuer numerischer Verfahren und Algorithmen konnten die relativistischen Korrekturen zur Ordnung $1/m$ erstmals mit Monte Carlo-Methoden berechnet werden [DESY 06-062]. Für Charmonium ist dabei die Größe der Korrektur vergleichbar mit dem Einfluss des Coulomb-Terms, während sie für Bottomonium nur ca. 25% davon beträgt, was qualitativ den Erwartungen entspricht. Das spin-abhängige Potenzial zur Ordnung $1/m^2$ wurde ebenfalls berechnet [DESY 06-061], wobei eine wesentlich höhere statistische Genauigkeit erzielt werden konnte als in früheren Rechnungen.

B-Physik

Ziel der Forschung auf dem Gebiet der B-Physik ist es, Präzisionsmessungen von B-Meson Zerfällen durchzuführen und innerhalb des Standardmodells ein theoretisch konsistentes Bild zu erarbeiten. Von zentraler Bedeutung sind hier die seltenen B-Meson Zerfälle, CP-verletzende Asymmetrien, und Massendifferenzen zwischen Masseneigenzuständen in neutralen B-Meson Komplexen ($B_d^0 - \overline{B}_d^0$ und $B_s^0 - \overline{B}_s^0$).

Höhepunkt der Experimente in der B-Physik im Jahr 2006 war die Messung der Massendifferenz zwischen den Mesonen $(B_s)_H$ und $(B_s)_L$ (Heavy und Light),

die die CDF Kollaboration am Fermilab veröffentlicht hat [hep-ex/0609040]. Der gemessene Wert, $\Delta M_s^{\text{CDF}} \equiv M_H(B_s) - M_L(B_s) = (17.77 \pm 0.10(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst.})) (\text{ps})^{-1}$, ist mit der Standardmodell-basierten Abschätzung, $\Delta M_s^{\text{SM}} = (20.3 \pm 3.0 \pm 0.8) (\text{ps})^{-1}$, die mit Hilfe der Gitter-QCD Methoden errechnet worden ist, in guter Übereinstimmung. Zusammen mit dem gemessenen Wert von $\Delta M_d \equiv M_H(B_d) - M_L(B_d) = (0.508 \pm 0.004) (\text{ps})^{-1}$ liefert das Verhältnis $\Delta M_d/\Delta M_s$ einen präzisen Wert für die CKM-Matrixelemente $|V_{td}/V_{ts}| = 0.206 \pm 0.008$, der mit dessen Abschätzung durch die Unitarität der CKM-Matrix übereinstimmt. Eine Folge dieser Konsistenz ist, dass in den $b \rightarrow (s, d)$ -Quarkübergängen kein wesentlicher Beitrag von der Physik jenseits des Standardmodells existiert. Dieser wurde quantitativ in einer theoretischen Arbeit in SUSY-Modellen abgeschätzt [DESY 06-033].

Die seltenen Zerfälle $B \rightarrow K^*(\rho, \omega)\gamma$ liefern unabhängige Informationen über die CKM-Matrixelemente V_{ts} und V_{td} . Das gemessene Zerfallsverhältnis $\mathcal{B}(B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma) = (1.11_{-0.18}^{+0.19}) \times 10^{-6}$ [HFAG 2006] ist mit den Standardmodell-basierten theoretischen Abschätzungen $\mathcal{B}(B \rightarrow (\rho, \omega)\gamma) = (1.32 \pm 0.26) \times 10^{-6}$ in guter Übereinstimmung [DESY 06-187]. In diesem Vergleich ist der Wert von $|V_{td}/V_{ts}|$ aus den $\Delta M_d/\Delta M_s$ -Messungen verwendet worden. Er dient als ein zusätzlicher Test der Flavourübergänge im Standardmodell.

Der Zerfall $B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-$ genießt experimentell sowie theoretisch weiterhin ein großes Interesse. Eine theoretische Untersuchung für die Zerfallsrate und die VR-Asymmetrie wurde mit Hilfe der sogenannten *Soft Collinear Effective Theorie* (SCET) angefertigt [DESY 06-002, 159]. Zentraler Punkt dieser Studie ist die Herleitung einer Faktorisierungsformel, basierend auf der führenden Ordnung in $1/m_b$ und aufsummiert zu allen Ordnungen in der starken Kopplungskonstanten α_s . Die verbesserte Theorie für diesen Zerfall erlaubt einen Präzisionstest der elektroschwachen Pinguin-induzierten Übergänge im Standardmodell.

Die Experimente an Tevatron und LHC werden in der Lage sein, eine ganze Reihe von B_s -Meson Zerfällen und die CP-Asymmetrien genau zu messen. In Erwartung dessen wurden die Zerfallsraten und CP Asym-

metrie in den Prozessen $\overline{B}_s^0 \rightarrow PP$, $\overline{B}_s^0 \rightarrow PV$ und $\overline{B}_s^0 \rightarrow VV$ theoretisch abgeschätzt, wobei hier P bzw. V für leichte Pseudoskalare (π, K, η, η') bzw. Vektormesonen (ρ, K^*, ω, ϕ) stehen. Diese Arbeit, die 2006 durchgeführt und Anfang 2007 veröffentlicht wurde, wird für die Erstellung eines quantitativen Bildes der Dynamik der nichtleptonischen B_s -Zerfälle hilfreich sein.

Außerdem wurde ein On-Shell Schema für die Renormierung der CKM-Matrix entwickelt [DESY 06-141]. Dieses Renormierungsschema ist so beschaffen, dass das CKM-Matrixelement V_{ud} keine endliche Korrektur erhält und die endlichen Verschiebungen der übrigen CKM-Matrixelemente numerisch klein sind [DESY 06-207].

Collider-Physik

Die theoretischen Untersuchungen zur Collider-Physik waren geprägt von physikalischen Problemstellungen am CERN-Protonencollider LHC, der in Kürze in Betrieb gehen wird, sowie von Vorbereitungen zur Physik am TeV- e^+e^- -Linearcollider ILC. Beide Maschinen versprechen, unsere Kenntnisse über die fundamentalen Strukturen der Materie und ihrer Wechselwirkungen wesentlich zu erweitern und zu vertiefen. Das physikalische Potential des ILC, neues Terrain jenseits des Standardmodells (SM) zu erforschen, ist in einem Snowmass-Workshop-Bericht [DESY 06-012] umfassend dokumentiert worden. Speziellere Fragen zur CP-Verletzung und Higgs-Physik jenseits des SM sind in einem weiteren Workshop-Bericht [CERN-2006-009] dargestellt worden. Die Arbeit der hiesigen Collider-Physik-Gruppe hat sich besonders auf Fragen zum Hochenergie-Limes der starken und elektroschwachen Wechselwirkung, zum Higgs-Mechanismus und zur Supersymmetrie konzentriert.

Hochenergie-Limes

Im Grenzfall hoher Energien liefern partonische Subprozesse der Hadroproduktion mit t-Kanal-Gluonaus-

tausch bekanntlich führende Beiträge. Daher muss der DGLAP-Formalismus dahingehend abgeändert werden, dass die Transversalimpulse (k_T) der aus den einlaufenden Hadronen stammenden, am harten Stoßprozess beteiligten Gluonen berücksichtigt werden. Die hier zugrundeliegende nichtlineare Gluodynamik wird, zumindest zu einem gewissen Grad, durch die Balitsky-Fadin-Kuraev-Lipatov-Evolutionsgleichungen (BFKL) beschrieben. Der Frage, ob die derzeit unbefriedigende Beschreibung der Daten zur Charmoniumzeugung aus verschiedenen Hochenergieexperimenten (Tevatron, HERA, LEP2) im Rahmen der NRQCD durch den Übergang von der kollinearen (DGLAP) zur k_T -Faktorisierung verbessert werden kann, wurde hier nachgegangen. Hierzu wurden zunächst die relevanten nichtstörungstheoretischen NRQCD-Matrixelemente (MEs) durch einen kombinierten Fit an Tevatron-Daten zur direkten bzw. prompten Hadroproduktion von J/ψ -Mesonen extrahiert. Zur Überprüfung der NRQCD-Faktorisierung wurden mit diesen MEs dann theoretische Vorhersagen für die Photo- bzw. Elektroproduktion in ep-Streuung und die Photoproduktion in e^+e^- -Streuung gewonnen und mit den entsprechenden Datensätzen von HERA und LEP2 verglichen. Das Ergebnis war ermutigend, obschon ein abschließendes Urteil wegen der beträchtlichen Unsicherheit in der unintegrierten Gluondichtefunktion derzeit noch nicht gefällt werden kann [DESY 06-019]. Eine ähnliche Studie wurde auch für Bottomonia durchgeführt [DESY 06-104].

Am LHC werden u. a. die Produktion von Jets, W- und Z-Bosonen sowie von schweren Quarks eine wichtige Rolle spielen. Dazu werden theoretische Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO) benötigt werden. Es wurde hier erstmalig eine NLO-Rechnung im Rahmen der k_T -Faktorisierung durchgeführt: als erster Schritt wurde die Jet-Produktion im Bereich kleiner Longitudinal-Impulse behandelt. Dabei wurde insbesondere die theoretische Konsistenz zwischen Jet-Produktionsvertex und unintegrierten Partondichten untersucht [DESY 06-115].

Unter den am ILC zu untersuchenden Streuprozessen nimmt die elastische Streuung der Vektorbosonen eine besondere Stellung ein: das Hochenergie-Verhalten der

WW-Streuamplitude weist auf die Existenz wenigstens eines skalaren Higgs-Teilchens hin. Daher wird dieser Prozess am ILC besonders genau vermessen werden. Es wurde hier das Hochenergieverhalten dieses Prozesses zu allen Ordnungen in der Näherung führender Logarithmen in der Schwerpunktsenergie im Rahmen des SM untersucht. Zusammen mit dem Hochenergieverhalten des Wirkungsquerschnittes wurde auch die Frage der Regge-isierung von W, Z und γ in allen Ordnungen untersucht [DESY 06-185].

Higgs-Mechanismus

Das Higgs-Boson des SM zerfällt in dem zwischen den Schranken aus direkter Suche und elektroschwachen Präzisionstests gelegenen Massenbereich vorwiegend in Bottom-Quarkpaare. Es wurde hier die führende elektroschwache Zweischleifenkorrektur der Ordnung $\mathcal{O}(G_F^2 m_t^4)$ zur partiellen Breite dieses Zerfalls berechnet. Sie vergrößert den positiven Effekt der Einschleifenkorrektur der Ordnung $\mathcal{O}(G_F m_t^2)$ um etwa +16% und überkompensiert die Abschirmung letzterer um -8% durch QCD-Effekte der Ordnung $\mathcal{O}(\alpha_s G_F m_t^2)$. Diese Untersuchung erfordert eine vollständige elektroschwache Zweischleifenrenormierung, die ausführlich erläutert wurde [DESY 06-235].

Die Möglichkeit der diffraktiven Higgs-Produktion am Tevatron sowie am LHC wird gegenwärtig besonders intensiv diskutiert. Diese hängt insbesondere von der berechneten Größe des Wirkungsquerschnittes und der sich daraus ergebenden Zahl der zu erwartenden Ereignisse ab. Es wurde hier ein Versuch unternommen, diesen Wirkungsquerschnitt in einer neuartigen Weise zu berechnen. Dabei wurde insbesondere darauf hingewiesen, dass die bisherigen Rechnungen auf einer theoretischen Annahme beruhen, die weiterer Klärung bedarf [DESY 06-003].

Als nicht-supersymmetrische Erklärung des Higgs-Mechanismus haben sich die Little-Higgs-Modelle etabliert. Zwei Klassen dieser Modelle sind bekannt, die sich durch die Symmetrie-Darstellungen im Eich- und im Higgssektor unterscheiden. Es konnte die Kopplung von Z-Boson, Higgs-Boson und Pseudo-Axion als das

Merkmal identifiziert werden, das beide Klassen separiert und sich in charakteristischen Signaturen bei LHC und ILC bemerkbar macht [DESY 06-055].

Sollte kein Higgs-Boson existieren, manifestiert sich der Mechanismus der elektroschwachen Symmetriebrechung in den Wechselwirkungen von W- und Z-Bosonen, die beispielsweise am ILC präzise gemessen werden können. Eine umfassende Untersuchung der Sensitivität auf neue Physik unter Einschluss auch aller bekannten experimentellen Studien wurde hier durchgeführt [DESY 05-067].

Supersymmetrie

Überzeugende Argumente sind aufgefunden worden, die eine supersymmetrische Erweiterung des SM nahelegen. Neue Teilchen, fermionische und bosonische Partner zum Spektrum des SM, werden mit Massen im Bereich von mehreren hundert GeV bis zu einem TeV erwartet. Mögliche Szenarien dieser supersymmetrischen Welt und ihrer Wechselwirkungen mit der Standardwelt sind außerordentlich komplex und erfordern sowohl LHC-Analysen bei maximalen Energien wie auch Hochpräzisionsanalysen an dem dafür am besten geeigneten e^+e^- -Linearcollider ILC [SLAC-PUB-11877].

Dies trifft insbesondere auf die Bestimmung der Spins supersymmetrischer Teilchen zu. Es konnte aufgezeigt werden [DESY 06-239], dass Messungen dieser grundlegenden Eigenschaft aller Teilchen am ILC in vollkommen modellunabhängiger Form ausgeführt werden können. Obwohl technisch schwierig, so lassen sich Kaskaden-Zerfälle supersymmetrischer Teilchen am LHC nichtsdestoweniger nutzen, um erste Einblicke in Spin- und Mischungsstrukturen zu gewinnen. Die Messung der τ -Polarisation in solchen Kaskaden [DESY 06-237] stellt ein sensibles Instrument für solche Untersuchungen bereit.

Für Charginos und Neutralinos, die vermutlich leichtesten supersymmetrischen Teilchen, sind am ILC hohe Produktionsraten zu erwarten, die Präzisionsmessungen der Parameter erlauben werden. Um diese Messungen

auf eine solide Grundlage zu stellen, ist eine theoretische Vorhersage in Form von Ereignissimulation mit vergleichbarer Genauigkeit notwendig. In diesem Zusammenhang wurde in ein Monte-Carlo-Generator vorgestellt, der die NLO-Strahlungskorrekturen vollständig einschließt, mit Hilfe geeigneter Resummationsmethoden den intrinsischen Fehler durch Phasenraumschnitte vermeidet und ausschließlich positive Ereignisgewichte produziert, so dass erstmals eine realistische und hinreichend präzise Simulation möglich wird [DESY 06-103, 189].

In der Vergangenheit haben Untersuchungen supersymmetrischer Theorien im Vordergrund gestanden, die durch Minimierung der Erweiterung des SM gekennzeichnet sind, insbesondere das minimale supersymmetrische SM (MSSM). Interne offene Fragen sowie externe Argumente aus der Superstring-Physik legen jedoch komplexere Strukturen nahe. Zwei Wege sind in diesem Zusammenhang besprochen worden. Über die $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ hinausgehende abelsche $U(1)$ - und nicht-abelsche $E(6)$ -Eichsymmetrien sind in diesem Zusammenhang besonders attraktiv. $U(1)$ erweitert den Chargino-Neutralino-Sektor der Supersymmetrie. Trotz erhöhter Komplexität kann das System dennoch analytisch beschrieben werden, wie in einer detaillierten Studie [DESY 05-066] dargestellt werden konnte (Abbildung 62). Eine $E(6)$ -Struktur des Spektrums an der Teraskala führt zudem zu einer Vereinigung der Wechselwirkungen (GUT) an der Planck-Skala, oberhalb der üblicherweise angenommenen GUT-Skala von 10^{16} GeV [DESY 06-099]. Ein solches Modell wäre über *exotische* Teilchen am LHC und am ILC zu identifizieren. Andere Fragestellungen wurden von rätselhaften Ereignissen induziert, z. B. isolierte Leptonen mit Jet und fehlendem Transversalimpuls, die im H1-Detektor bei HERA entdeckt worden sind. Supersymmetrische Theorien, in denen die R-Paritätsquantenzahl nicht erhalten ist und in denen supersymmetrische Teilchen einzeln erzeugt werden können, werden häufig mit diesen Ereignissen in Zusammenhang gebracht. Wenn diese Interpretation zuträfe, so müssten stringente kinematische Konsistenzbedingungen erfüllt werden. Darüber hinaus würden neue Klassen von Multi-Lepton-Ereignissen vorausgesagt, die

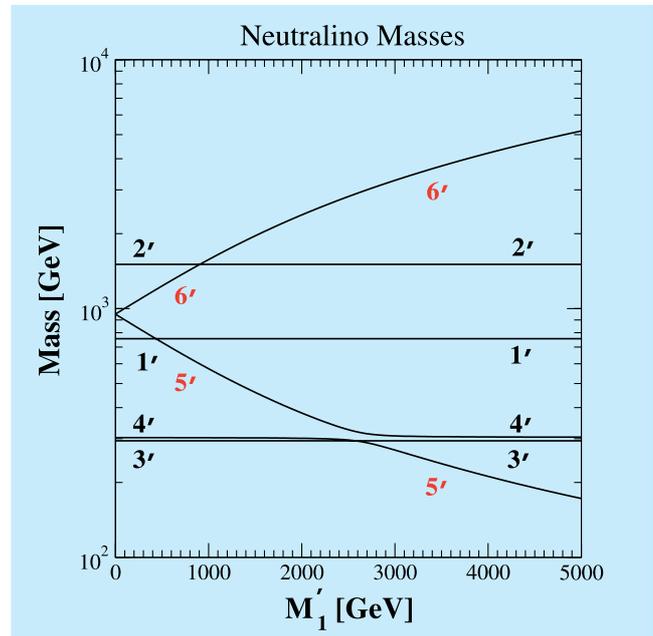


Abbildung 62: Massen der Neutralinos, Partner neutraler Eich- und Higgs-Bosonen in der um eine abelsche $U(1)$ -Eichsymmetrie erweiterten supersymmetrischen Minimal-Theorie. Der Parameter M'_1 kennzeichnet die möglichen Werte der $U(1)$ -Massenskala.

in den HERA-Experimenten gefunden werden sollten, falls die supersymmetrische Deutung zuträfe [DESY 06-238].

Kosmologie und Astroteilchenphysik

Dunkle Materie, dunkle Energie und Inflation

In supersymmetrischen Theorien sind neben dem leichtesten Neutralino auch das Gravitino [DESY 06-243] und das Axino [DESY 06-184], die Superpartner des Gravitons und des Axions, attraktive Kandidaten für den Hauptbestandteil der kalten dunklen Materie. Im Gegensatz zum Neutralino haben Gravitino und Axino nur extrem schwache Wechselwirkungen. Die heute

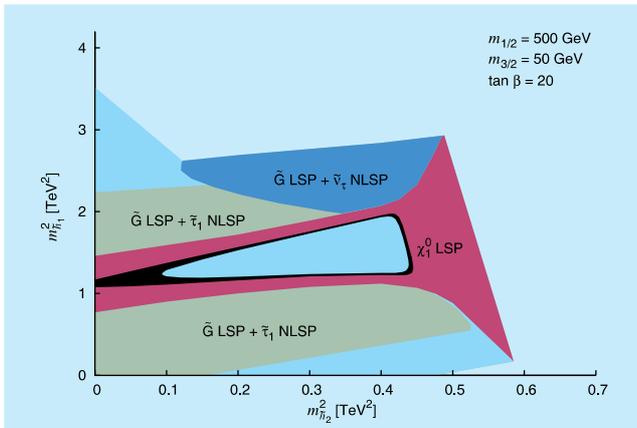


Abbildung 63: *Bereiche der Higgs-Massenparameter $m_{h_1}^2$ und $m_{h_2}^2$ mit Neutralino (χ_1^0) oder Gravitino \tilde{G} als LSP und skalarem Tau-Lepton ($\tilde{\tau}_1$) oder skalarem Neutrino ($\tilde{\nu}_\tau$) als NLSP.*

gravitativ wirkende dunkle Materie wird im frühen Universum thermisch erzeugt. Im Gaugino-Mediation-Mechanismus der Supersymmetriebrechung können, in Abhängigkeit der Higgsmassen, sowohl Neutralino als auch Gravitino das leichteste Superteilchen (LSP) sein (Abbildung 63). Das erlaubte supersymmetrische Massenspektrum ist dabei durch Nukleosynthese und Leptogenese stark eingeschränkt [DESY 06-067, 158]. Diese Einschränkungen können durch Entropieerzeugung vor Beginn der Nukleosynthese verändert werden [DESY 06-064].

Moduli-Felder sind im Rahmen von Stringtheorien interessante Kandidaten für das Inflatonfeld. Ihr Zerfall erzeugt Gravitinos, die zu einer zu großen Dichte dunkler Materie führen können [DESY 06-014, 072]. Dies führt zu starken Einschränkungen an Inflationsmodelle [DESY 06-014, 242] und an den Mechanismus der Supersymmetriebrechung [DESY 06-035, 106]. Der Zerfall von Moduli kann auch zur Erzeugung der dunklen Materie und der Materie-Antimaterie-Asymmetrie führen [DESY 06-071, 149]. Die Einsteinsche Gravitationstheorie mit zusätzlichen Moduli-Feldern hat häufig die Form einer Jordan-Brans-Dicke Theorie [DESY 06-076, 195], die auch supersymmetrisch formuliert werden kann [DESY 06-211]. Weitere wichtige Konsequenzen der Existenz leichter Skalar-

feldern sind die Veränderung der Hubble-Expansion während der Nukleosynthese [DESY 06-077] sowie der Beitrag zur dunklen Energie, der durch Entropiebetrachtungen eingeschränkt werden kann [DESY 06-190].

Die Daten der WMAP-Kollaboration für die kosmische Hintergrundstrahlung schränken mögliche Inflationsmodelle stark ein. Dies wird deutlich durch den Effekt einer hypothetischen Stufe im sonst flachen primordialen Spektrum der Dichtefluktuationen [DESY 06-089]. Weitere wichtige Einschränkungen ergeben sich auch für die effektive Anzahl der Neutrinos [DESY 06-212].

Teilchenphysik mit Neutrinoobservatorien

Eine interessante Frage ist, welche Rolle Neutrinoobservatorien wie IceCube bei der Entdeckung und Erforschung von supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells spielen könnten, insbesondere in populären Modellen, in denen das zweitleichteste Superteilchen ein langlebiges Stau ist. In der Tat stellt es sich heraus, dass in diesem Fall bei IceCube mit bis zu 50 hintergrundfreien, von kosmischen Neutrinos initiierten Stau-Paar-Ereignissen pro Jahr zu rechnen ist, falls das Superteilchen-Massenspektrum und der hochenergetische kosmische Neutrinofluss nahe der gegenwärtigen Grenzen liegen [DESY 06-046, 193].

Kürzlich wurde gezeigt, dass eine hypothetische neue Neutrinowechselwirkung, die durch ein sehr leichtes Skalarfeld vermittelt wird, den kosmischen Urknall-Neutrinohintergrund zu einem potentiellen Kandidaten für die dunkle Energie macht. Eine Chance für einen Test dieser Hypothese wird nun dadurch eröffnet, dass hier die effektiven Massen der Neutrinos in vorhersagbarer Weise von den Neutrino-Energiedichten abhängen. Letztere Abhängigkeiten hinterlassen Spuren in den Absorptionslinien in den hochenergetischen kosmischen Neutrinospektren, welche von der resonanten Annihilation von hochenergetischen Neutrinos mit den Urknall-Hintergrundneutrinos in Z-Bosonen herrühren. Das diesbezügliche Entdeckungspotenzial von Neutrino-Observatorien wie ANITA und LOFAR wurde eingehend untersucht [DESY 06-088, 210].

Vereinheitlichte Theorien und schwach wechselwirkende Teilchen

Die Symmetrien des Standardmodells und die Quantenzahlen von Quarks und Leptonen finden eine natürliche Erklärung in vereinheitlichten Theorien (GUTs) bei sehr kleinen Abständen. Diese Theorien erklären ebenfalls, über den Seesaw-Mechanismus, die empirische Evidenz für sehr kleine Neutrinomassen, sowie, vor allem in supersymmetrischen GUTs, die Vereinigung der Eichkopplungen bei der GUT-Massenskala. Theoretisch attraktiv sind vor allem vereinheitlichte Theorien in mehr als vier Raum-Zeit-Dimensionen, die als Zwischenschritt zwischen dem Standardmodell und Stringtheorien auftreten können.

Die Vereinigung der Eichkopplungen wurde in SO(10) GUTs in sechs Dimensionen untersucht [DESY 06-148, 200]. Für die Behandlung der Quantenkorrekturen sind dabei an Fixpunkten lokalisierte kinetische Terme für Materie- und Eichfelder [DESY 06-028], sowie die Kopplungen zwischen lokalisierten *Brane*-Feldern und nichtlokalisierten *Bulk*-Feldern [DESY 06-131] wichtig. Wesentliche Fortschritte wurden erzielt in der Einbettung sechsdimensionaler supersymmetrischer GUTs in die heterotische Stringtheorie [DESY 06-059]. Dabei wurden insbesondere Vakuumstruktur und Supersymmetriebrechung besser verstanden. Eine besondere Rolle spielt das Top-Quark, das, wie auch die Higgsbosonen, *Bulk*-Zuständen entspricht.

Die Neutrinophysik spielt über den Seesaw-Mechanismus eine entscheidende Rolle in der Verknüpfung der Fermi-Massenskala der elektroschwachen Symmetriebrechung mit der GUT-Massenskala. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Zusammenhang zwischen der Massenhierarchie der leichten und schweren Neutrinos [DESY 06-232].

Vereinheitlichte Theorien, insbesondere diejenigen, welche auf einer Einbettung in Stringtheorien basieren, sagen nicht nur neue, sehr schwere ($\gg 100$ GeV), sondern auch neue, sehr leichte ($\ll 1$ eV) Teilchen voraus, welche nur sehr schwach mit gewöhnlicher

Materie wechselwirken. Prominente Kandidaten sind Axionen, Dilatonen und milligeladene Teilchen [DESY 06-133]. Folglich können Präzisionsexperimente mit niederenergetischen Photonen komplementäre teilchenphysikalische Informationen liefern zu Experimenten an hochenergetischen Collidern. Das Laser-Polarisationsexperiment PVLAS hat möglicherweise das erste indirekte Signal solcher neuer, sehr schwach wechselwirkender leichter Teilchen gesehen: Es wurde eine anomal große scheinbare Rotation der Polarisationssebene von Photonen nach dem Durchgang durch ein Magnetfeld beobachtet. Dies kann als Evidenz für das Verschwinden von Photonen durch Teilchenproduktion – entweder einzelne Produktion von Axion-artigen Teilchen (ALPs) oder Paarproduktion von milligeladenen Teilchen (MCPs) – gedeutet werden [DESY 06-105, 221]. Photon-Regenerationsexperimente [DESY 06-098, 228] an verschiedenen Laboren, unter anderem das *Axion-Like Particle Search* (ALPS) Experiment bei DESY, werden im Laufe des Jahres 2007 die ALPs-Hypothese testen. Alternative Experiment-Konzepte zum potentiellen Test der MCP-Hypothese wurden vorgeschlagen [DESY 06-132]. Die Kompatibilität der ALP Interpretation von PVLAS mit astrophysikalischen Beobachtungen wurde detailliert untersucht [DESY 06-068, 188].

Stringtheorie

Im zurückliegenden Jahr haben Mitarbeiter der Stringtheorie Arbeitsgruppen der DESY Theorie und des II. Instituts für Theoretische Physik der Universität Hamburg ein weites Themenspektrum behandelt mit Arbeiten zu Supersymmetrie und Supergravitation, an verallgemeinerten Stringkompaktifizierungen, an Problemen der AdS/CFT Korrespondenz sowie an Aspekten einer Quantengravitation und Stringkosmologie.

Stringtheorie in AdS Hintergründen

Das Verständnis nicht-linearer Sigma-Modelle auf Anti-deSitter (AdS) Räumen ist von grundlegender Bedeutung für viele Bereiche der theoretischen Phy-

sik. Insbesondere ergibt sich aus der sogenannten AdS/CFT Korrespondenz ein völlig neuartiger Weg zur Behandlung von stark gekoppelten Eichtheorien (z. B. der Quantenchromodynamik). Interessante Einsichten lassen sich sogar schon aus dem Gravitationslimes gewinnen [DESY 06-083, 213].

Man weiss, dass sehr viel mehr Informationen in der AdS/CFT Korrespondenz enthalten sind. So eröffnen Techniken der Stringtheorie im Prinzip die Möglichkeit, das Spektrum anomaler Dimensionen vieler interessanter Eichtheorien zu bestimmen. In sehr speziellen Grenzfällen lassen sich die notwendigen Berechnungen schon heute durchführen [DESY 06-018]. Um derartige Ideen jedoch in systematische Rechenmethoden für die Eichtheorie umsetzen zu können, bedarf es der vollständigen Konstruktion von Stringtheorien auf einer ganz neuartigen Klasse von gekrümmten Hintergründen. Deren charakteristische Eigenschaften sind unter anderem die Existenz einer fünften nicht-kompakten Dimension, und das Auftreten von superkonformen Symmetrien der Super-Raum-Zeit.

Im vergangenen Jahr ist es der DESY Theoriegruppe zum ersten Mal gelungen, eine Serie von nicht-linearen Sigma Modellen mit super-konformer Symmetrie zu lösen [DESY 06-147]. Die Ideen dieser Konstruktionen fanden bereits direkte Anwendungen auf die Untersuchung spezieller supersymmetrischer Spinketten und verwandter Systeme der statistischen Mechanik [DESY 06-201]. Randbedingungen in derartigen supersymmetrischen Modellen und in einem bosonischen Untersektor waren Gegenstand von [DESY 06-219, 171].

Ferner wurden beginnend mit [hep-th/0602093] für das Sinh-Gordon Modell Methoden zur exakten Bestimmung des Spektrums entwickelt. Wichtig war dabei vor allem eine geeignete Verallgemeinerung des Bethe-Ansatzes, der auf Modelle mit nichtkompakter Raum-Zeit nicht anwendbar ist. Die Sinh-Gordon Theorie gilt als Modell für die fünfte Dimension von AdS₅ Hintergründen. Es ist daher zu erwarten, dass die Kombination der in den letzten zwei Absätzen beschriebenen Ergebnisse ganz wesentlich beiträgt zur exakten Lösung der relevanten Sigma-Modelle auf AdS Hintergründen und damit auch zur Lösung der in [hep-th/0610250] beschriebenen Probleme.

Stringkompaktifizierungen, Gravitation und Kosmologie

Stringkompaktifizierungen auf sogenannten verallgemeinerten Calabi-Yau Mannigfaltigkeiten sind insbesondere wegen Ihrer phenomenologischen Eigenschaften von großem Interesse. Mitarbeiter der Stringtheorie Arbeitsgruppe der II. Universität Hamburg haben sowohl perturbative als auch nicht-perturbative Dualitäten solcher Kompaktifizierungen aus Sicht der Supergravitation untersucht [DESY 06-009, 058, 155, ZMP-HH-2006-12, 19]. Mathematische Aspekte von topologischen offenen Strings in Calabi-Yau Kompaktifizierungen waren das Thema der Veröffentlichungen [DESY 06-013, 024].

Aspekte des Entropiefunktionals schwarzer Löcher wurden in [gr-qc/0605017] studiert. Mit Hilfe geometrische Methoden konnte dabei insbesondere die Existenz von statischen kugelsymmetrischen schwarzen Löchern ausgeschlossen werden. Motiviert durch die Stringtheorie wurden außerdem Raum-Zeit Mannigfaltigkeiten mit einer Flächenmetrik und die daraus resultierenden Kosmologien [hep-th/0612141].

Das Verhalten von Strings in zeitabhängigen bzw. kosmologischen Hintergründen war Gegenstand eines weiteren Projektes. Darin sollte eine weitverbreitete Ansicht kritisch analysiert werden derzufolge Renormierungsgruppenflüsse der den Hintergrund charakterisierenden zweidimensionalen Quantenfeldtheorien zumindest einige qualitative Aspekte der Zeitabhängigkeit korrekt widerspiegeln. In [hep-th/0608003] wurde erstmals ein Beispiel für ein zeitabhängiges Phänomen in der Stringtheorie vorgestellt, in welchem diese Frage in einem gut kontrollierten Rahmen untersucht werden konnte.

Mathematische Physik

Einer der Schwerpunkte war die Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Raumzeiten. Hier wurde die Möglichkeit der Topologieänderung und der algebraischen Beschreibung von Randbedingungen untersucht. Au-

ßerdem wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, wie eine hintergrundsunabhängige störungstheoretische Quantengravitation definiert werden kann [gr-qc/0603079].

Ein anderer Schwerpunkt waren nichtkommutative Raumzeiten. Hier wurden die Rolle eines Twists bei der Einführung der Nichtkommutativität [hep-th/0603024] und die Frage der einer getwisteten Lorentzsymmetrie studiert [DESY 06-047]. Weiter wurde der Einfluss auf die Teilchenstruktur einer solchen Theorie betrachtet [DESY 06-060]. Neue Ideen für die Formulierung von Gravitationsfeldern auf nichtkommutativen Räumen wurden entwickelt [hep-th/0608135, hep-th/0611025, hep-th/0607251].

Einen dritten Schwerpunkt bildeten geometrische Konstruktionen von alternativen Gravitationstheorien. Es wurden Theorien untersucht, deren Lösungen Beschränkungen der Schnittkrümmungen erfüllen. Für sphärisch symmetrische Raumzeiten konnte die geodätische Vollständigkeit gezeigt werden [gr-qc/0605017]. Weiterhin wurden Geometrien untersucht, die nicht auf einer Metrik, sondern auf einem Flächenmaß beruhen. Die mathematischen Eigenschaften einer solchen Struktur wurden analysiert und einige ihrer Konsequenzen diskutiert. Insbesondere konnte eine Gravitationstheorie formuliert werden [hep-th/0612141], die ohne zusätzliche Annahmen die beobachtete Beschleunigung des Universums erklären kann [hep-th/0612133].

Ein weiterer Schwerpunkt war die gruppentheoretische Quantisierung der topologisch nicht-trivialen Phasenräume $S^1 \times \mathbb{R}$ und $S^1 \times \mathbb{R}^+$. Der erste entspricht dem kanonischen Paar *Winkel und Bahndrehimpuls um eine feste Achse*, der zweite dem Paar *Winkel und Wirkungsvariable*, z. B. beim harmonischen Oszillator, für den man so eine neue reichhaltigere Quantenmechanik bekommt [DESY 06-209].

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte

In Kooperation mit europäischen Universitäten ist die Hamburger Theoriegruppe weiterhin an den folgenden

virtuellen Instituten der Helmholtz Gesellschaft sowie an Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppen beteiligt, vorwiegend mit Projektleitern aus der DESY Theorie:

Virtuelle Institute:

- VH-VI-106: *Particle Cosmology (VIPAC)*
- VH-VI-032: *Hochenergiestrahlungen aus dem Kosmos (VIHKOS)*

Nachwuchsgruppen:

- VH-NG-004: *QCD in exklusiven Prozessen bei HERA*,
- VH-NG-005: *Universelle Ereignisgeneratoren für zukünftige Lepton-Collider*,
- VH-NG-006: *Particle Physics and Cosmology*,
- VH-NG-008: *Hochpräzisionsanalyse von Top-Quark Eigenschaften bei TESLA*.

Die Hamburger DESY Theorie ist maßgeblich an einem großen DFG-Sonderforschungsbereich (SFB 676), der Universität Hamburg über *Teilchen, Strings und frühes Universum: Struktur von Materie und Raum-Zeit* beteiligt. Sechs theoretische Projekte werden gemeinsam von Mitgliedern des Hamburger II. Instituts für Theoretische Physik und der Hamburger DESY Theorie geleitet. Vier theoretische Projekte betreffen ausschließlich das II. Institut für Theoretische Physik. In weiteren SFB 676 Projekten geht es um eine Zusammenarbeit von Theoretikern mit Mitgliedern der experimentellen Institute.

DESY nimmt weiterhin am großen High Energy Physics Latinamerican-European Network (HELEN) zwischen der Europäischen Union und Latein Amerika teil. Hauptziel ist die Förderung der Ausbildung und des akademischen Austauschs von Hochenergiephysikern aus den 36 Mitgliedsinstitutionen. Die Koordination von HELEN bei DESY sowie eine Mitgliedschaft im HELEN Executive Board liegt bei der DESY Theorie in Hamburg.

Außerdem sind die folgenden Drittmittelprojekte zu nennen:

- Stipendium der EU-Kommission zum Aufbau eines Marie-Curie-Exzellenzteams,
- BMBF-Projektförderung (05 HT6GUA):
Theoretische Interpretation von Hochenergieexperimenten mit HERA, LEP und Tevatron sowie Vorhersagen für LHC und TESLA,
- DAAD-Programm *PROCOPE* mit École Polytechnique, Palaiseau, Frankreich,
- DAAD-Programm (D/03/39334)
Acciones Integradas Hispano-Alemanas,
- Graduiertenkolleg der DFG (GRK 602):
Zukünftige Entwicklungen in der Teilchenphysik,
- DFG-Schwerpunktprogramm (SPP 1096)
Stringtheorie,

sowie eine Reihe von DFG-Sachbeihilfen (KN-365/3, KN-365/5...7) am II. Institut für Theoretische Physik. Eine Reihe von Gastwissenschaftlern wurden durch verschiedene Drittmittel und Stipendien unterstützt.

Drei mit dem (Helmholtz-) Humboldt-Forschungspreis ausgezeichnete internationale Spitzenforscher verbrachten wieder zum Teil längere Forschungsaufenthalte bei der Hamburger DESY-Theorie und trugen damit maßgeblich zur stimulierenden Forschungsatmosphäre in der Theoriegruppe bei.

Mitarbeit bei der Organisation von Konferenzen

- DESY Theorie Workshop 2006:
The Dark Universe, DESY, Hamburg
- Sino-German Workshop:
Frontiers in QCD, DESY, Hamburg
- *Tools for SUSY and New Physics*,
Annecy-le-Vieux, Frankreich
- 8th DESY (in Zeuthen) Workshop on Elementary Particle Theory:

Loops and Legs in Quantum Field Theory,
Eisenach

- 14th International Conference:
Supersymmetry and the Unification of Fundamental Interactions,
University of California, Irvine, USA
- 2nd Workshop on the Implications of HERA for LHC physics:
HERA and the LHC 2006,
CERN, Genf, Schweiz
- Mini-Workshop:
Superweakly Interacting Dark Matter,
DESY, Hamburg
- Kosmologietag
Internationales Begegnungszentrum Bielefeld
- 1st Northern German String workshop
DESY, Hamburg
- *Strings and high energy QCD*,
DESY, Hamburg
- 15th Int. Congress on Mathematical Physics,
Rio de Janeiro, Brasilien

Aktivitäten in Zeuthen

Gitter-Eichtheorie

Die Theorie zur Beschreibung der Eigenschaften der Starken Kraft, die Quantenchromodynamik (QCD), ist ein Grundpfeiler des Standardmodells der theoretischen Teilchenphysik. Für die quantitative Überprüfung und Anwendung dieser Theorie ist es erforderlich, die Größen, die im Experiment gemessen werden, ausgehend von den Grundgleichungen des Standardmodells genau zu bestimmen. Da dies nicht immer mit analytischen Methoden möglich ist, sind aufwändige numerische Simulationen auf einem diskretisierten Raum-Zeit-Gitter oft der einzige Lösungsweg, um eben jene Größen zu berechnen, die für die Interpretation von experimentellen Messungen benötigt werden.

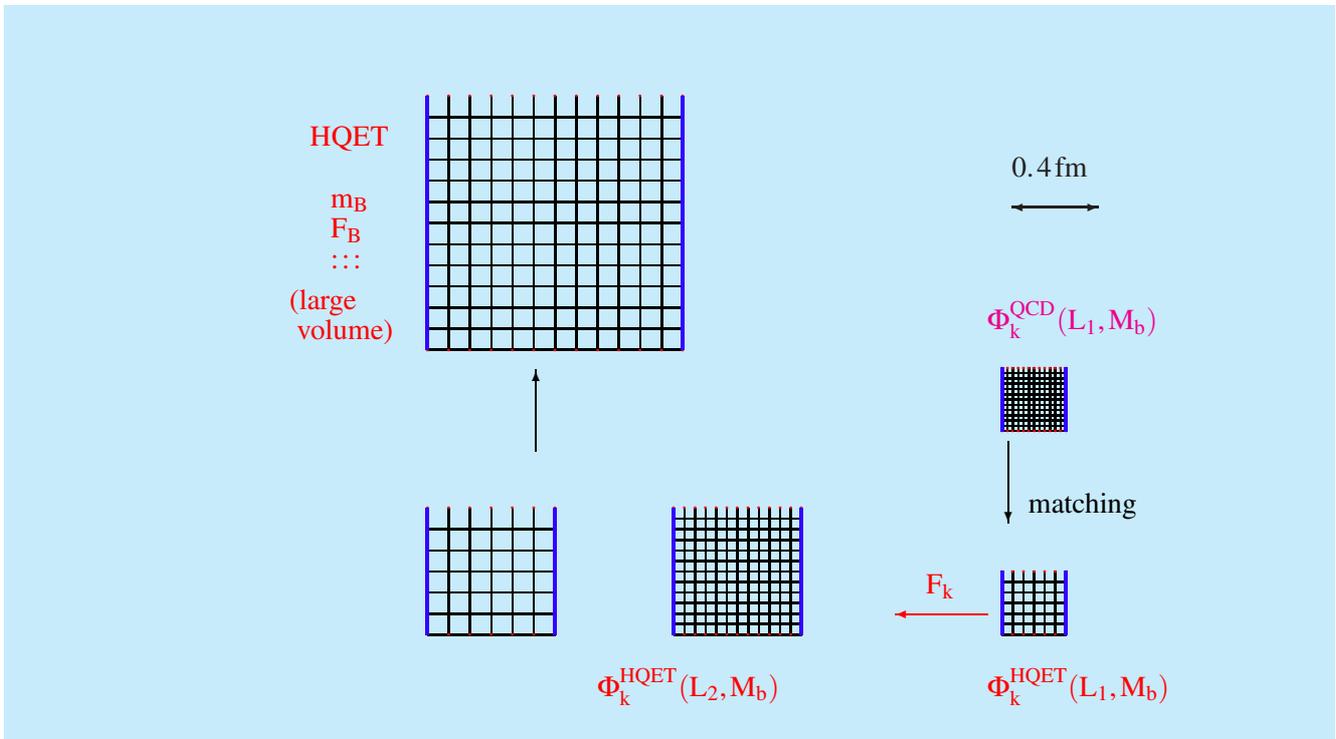


Abbildung 64: In der Berechnung von B-Mesonen werden Simulationen auf Gittern unterschiedlicher physikalischer Grösse und Auflösung kombiniert um Diskretisierungsfehler bei vertretbarem numerischen Aufwand zu minimieren.

Neben dieser Überprüfung der Theorie spielt die Gittereichtheorie eine entscheidende Rolle bei der Interpretation der Experimente an B-Meson-Fabriken. Um hier die fundamentale elektroschwache Theorie mit den experimentellen Beobachtungen zu verknüpfen, müssen zuvor QCD-Matrixelemente berechnet werden.

Quantenchromodynamik und Flavorphysik

In Zusammenarbeit mit der Universität Münster wurde ein nichtperturbativer Zugang zur *Heavy Quark Effective Theory* entwickelt. Sie erlaubt zum Beispiel ausgehend von den Parametern der QCD, B-Meson Eigenschaften zu berechnen, ohne zusätzliche unbekannte Größen einzuführen (siehe Abbildung 64). Im vergangenen Jahr wurde eine Anwendung abgeschlos-

sen, die erstmals Korrekturen der Ordnung Λ_{QCD}/m_b beinhaltet. So konnte in der sogenannten quenched Approximation der Zusammenhang zwischen der Masse des b-Quarks und der Masse des B-Mesons mit ca. 1% Genauigkeit bestimmt werden [hep-ph/0609294]. In einer alternativen Strategie zur Behandlung von B-Mesonen auf dem Gitter, konnte die Präzision verbessert werden, indem Extrapolationen in der Quark Masse durch Resultate in der Heavy Quark Effective Theory eingeschränkt wurden [hep-lat/0605016]. Neben der B-Physik ist die K-Physik entscheidend für unser Verständnis der CP-Verletzung und eröffnet die Chance, Physik außerhalb des Standardmodells zu entdecken. In einer weiteren Arbeit in der quenched Approximation wurden hierfür benötigte Matrixelemente berechnet [hep-lat/0605016].

Simulationen, die über die quenched Approximation hinausgehend die Effekte der dynamischen Quarks

berücksichtigen, sind eine numerische Herausforderung. Hier konnte ein Beitrag zur Effektivitätssteigerung geleistet werden, indem nachgewiesen wurde, dass eine einfache Optimierung eines der Parameter im Standardalgorithmus eine signifikante Beschleunigung der Simulationen bewirkt [hep-lat/0606004].

In einer Reihe theoretischer Arbeiten wurden effektive Stringtheorien untersucht sowie interessante Summenregeln in Gittereichtheorien diskutiert [hep-lat/0609007, hep-lat/0607015, hep-th/0602281].

Das APE-Projekt: Entwicklung und Nutzung von Parallelrechnern

Die zuverlässige Bestimmung von physikalischen Größen durch numerische Simulationen der auf einem Raum-Zeit-Gitter diskretisierten Quantenchromodynamik (QCD) erfordert eine enorme Rechenleistung. Diese Berechnungen können aber sehr gut auf relativ einfachen Rechnerarchitekturen parallelisiert werden.

Am Standort Zeuthen beteiligt sich DESY seit Jahren intensiv an Rechnerentwicklungen im Rahmen des APE Projektes (*Array Processor Experiment*), das Mitte der 80er Jahre am Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Italien initiiert wurde. Die Entwicklergruppe in Zeuthen arbeitete in 2006 insbesondere an der Erweiterung und Optimierung der Compiler-Software und des Betriebssystems der apeNEXT Rechner. Die neuen Architekturmerkmale von apeNEXT, wie z. B. die Vereinigung sämtlicher Prozessor- und Kommunikationsfunktionen auf jedem Knoten, führen zu komplexen Herausforderungen für die System-Software. Gleichzeitig eröffnen sich dadurch aber auch neue interessante Möglichkeiten für die Implementierung und Optimierung von Anwendungsprogrammen, wie sich z. B. bei einer Untersuchung zur *Fast Fourier Transformation* (FFT) herausstellte.

Eine größere Installation der neuesten Rechnergeneration, apeNEXT, mit rund 2000 Prozessoren und 2.5 Teraflops Rechenleistung wurde im vergangenen Jahr von Mitgliedern der DV-, Theorie- und NIC-Gruppen in Zeuthen aufgebaut und in Betrieb genommen. Dabei

galt es zunächst die Zuverlässigkeit und Stabilität der Maschinen sicherzustellen. Hierfür wurden neben speziell entwickelten Testsequenzen sofort auch komplexe Anwendungsprogramme für umfangreiche physikalische Simulationen verwendet.

Seit Sommer 2006 werden die apeNEXT Rechner im Rahmen des John von Neumann-Institute for Computing (NIC) für verschiedene Forschungsprojekte in Gitter-QCD mit internationaler Beteiligung zur Verfügung gestellt. Die Forschergruppen wurden bei der Umstellung und Optimierung ihrer Programme intensiv unterstützt. Der Umstieg wurde den Benutzern dadurch erleichtert, dass Programme von der Vorgängermaschine APEmille meist ohne wesentliche Änderungen auch auf apeNEXT laufen. Natürlich sind dann umfangreiche apeNEXT-spezifische Optimierungen erforderlich, um auch die gewünschte Effizienz von bis zu 50% zu erreichen.

Im Laufe dieses Jahres wurden bereits zahlreiche wissenschaftliche Ergebnisse produziert. Die apeNEXT-Rechner wurden insbesondere für die Erzeugung von Eichfeld-Konfigurationen mit dynamischen Fermionen genutzt. Sowohl die APEmille- als auch die apeNEXT-Rechner wurden intensiv für die Auswertung derartiger Konfigurationen zur Berechnung von physikalischen Observablen eingesetzt.

Um junge Forscher im Umgang mit High Performance Computing sowie Grid-Technologien weiterzubilden, wurde von der NIC- und DV-Gruppe der Workshop *Lattice Practices 2006* organisiert.

Da die Rechenleistung von apeNEXT nur für eine begrenzte Zeit ausreichen wird, um international konkurrenzfähige Großforschungsprojekte durchzuführen, beteiligen sich die Entwickler aus Zeuthen auch an Studien zur Machbarkeit und Evaluation von zukünftigen Architekturen.

Physik an Beschleunigern

Perturbative Untersuchungen auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung (QCD) befassten sich mit Frage-

stellungen aus dem Bereich der tiefinelastischen Streuung und mit Vorhersagen für Streuprozesse am Large Hadron Collider (LHC).

Die QCD-Berechnungen in der tief-inelastischen Strukturfunktionen wurden fortgesetzt [hep-ph/0608307] und die Analyse der flavor non-singlet tief-inelastischen Welt Daten abgeschlossen [hep-ph/0606309, hep-ph/0607200]. In dieser Analyse, die effektiv bis zum Niveau der $O(\alpha_s^4)$ Korrekturen durchgeführt wurde, wurde neben den Valenzquarkverteilungen mit korrelierten Fehlern die starke Kopplungskonstante $\alpha_s(M_Z^2)$ zu 0.1141 ± 0.0022 bestimmt. Außerdem wurden die $O(\alpha_s^3)$ Korrekturen für die schweren Quark Beiträge zur Strukturfunktion $F_L(s, Q^2)$ im Bereich $Q^2 \gg m_Q^2$ berechnet [hep-ph/0608023, hep-ph/0608024], massive Matrixelemente zu zwei Schleifen untersucht [hep-ph/0607300], sowie frühere Arbeiten zur diffraktiven Streuung erweitert [hep-ph/0604019]. Die Gruppe leistete auch Beiträge zum HERA-LHC Workshop, die in zusammenfassender Form in [hep-ph/0601012, hep-ph/0601013] veröffentlicht wurden.

Die QCD-Korrekturen zu den (zeitartigen) Fragmentationsfunktionen wurden systematisch studiert und die Evolution zu nächst-nächst-führender Ordnung verbessert. Das neue zentrale Ergebnis hier sind die non-singlet Splittingfunktionen zu drei Schleifen [hep-ph/0604053, hep-ph/0608307]. Darüber hinaus konnten die Koeffizientenfunktionen zu $O(\alpha_s^2)$ in einer der Mellin-Darstellung berechnet werden [hep-ph/0604160] und eine effiziente numerische Darstellung mit nur wenigen harmonischen Summen wurden in [hep-ph/0604019] angegeben. Das wesentlich verbesserte Verständnis der Fragmentation vor allem von schweren Quarks führte zur ersten vielbeachteten Weltanalyse von $B\bar{B} \rightarrow X_s \gamma$ at $O(\alpha_s^2)$ in [hep-ph/0609232]. Des Weiteren konnten QCD Korrekturen zur b-Quark Energieverteilung im Higgs-Boson Zerfall resummiert werden [hep-ph/0605011].

Untersuchungen für Streuprozesse an Hadron-Beschleunigern hatten als weiteren Schwerpunkt Präzisionsvorhersagen für die Produktion massiver Teilchen. Hier konnte die Struktur der Singularitäten von massi-

ven QCD Amplituden allgemein geklärt werden [hep-ph/0612149].

Arbeiten zum ILC beinhalteten die Berechnung von Anteilen Top-Quark Paarproduktion zu nächst-nächst-führender Ordnung [hep-ph/0608287].

Im Projekt zur Berechnung der Zwei-Schleifenkorrekturen zur massiven Bhabha-Streuung wurden alle Masterintegrale für die planaren massiven Boxdiagramm-Topologien im Falle $N_f = 1$ ermittelt [hep-ph/0602102, hep-ph/0604101]. Die Masterintegrale im Fall $N_f = 2$ schließen Beiträge anderer Fermionen als nur Elektronen mit ein und enthalten eine weitere Massenskala [hep-ph/0609051]. Damit sind alle Masterintegrale bekannt, bis auf die besonders schwierigen sogenannten nichtplanaren. Daran wird zurzeit gearbeitet. Ein besonders wichtiges Resultat in der Zweischleifen-Renormierung des elektroschwachen Standardmodells ist die komplette Formulierung der Renormierungsbedingungen, die Lösung der Renormierungsgleichungen, sowie die Ermittlung der entsprechenden numerischen Techniken in einer Serie von Arbeiten [hep-ph/0612122, hep-ph/0612123, hep-ph/0612124].

Konferenzen

Die Theoriegruppe war an der Organisation mehrerer Konferenzen und Schulen beteiligt:

- CERN/DESY workshop on *HERA and the LHC* 6–9 Jun 2006, Geneva, Switzerland.
- Helmholtz Int. Summer School (HISS) and Dubna Int. Advanced School of Theoretical Physics (DIAS TH), *Calculations for Modern and Future Colliders (CALC 2006)* 15 – 25 Jul 2006, Dubna, Russia.
- DESY workshop on *Loops and Legs in Quantum Field Theory (LL2006)* 23 – 28 Apr 2006, Eisenach, Germany.
- Die Proceedings des X International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research (ACAT05) wurden fertiggestellt und veröffentlicht.

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte Aktivitäten am NIC

Der Bereich Theorie ist Mit Antragsteller bei zwei in 2006 neu genehmigten TMR-Netzwerken zur Nachwuchsausbildung der Europäischen Union: *Tools and Precision Calculations for Physics Discoveries at Colliders*, MRTN-CT-2006-035505, und *Entering the high-precision era of flavour physics through the alliance of lattice simulations, effective field theories and experiment*, MRTN-CT-2006-035482.

Im Berichtszeitraum wurde S. Moch im Rahmen der Helmholtz-Hochschulnachwuchsgruppe VH-NG-105 *Computer algebra and higher orders in particle theory* von der Helmholtz-Gemeinschaft gefördert.

Im Berichtszeitraum wurde für den DFG-Sonderforschungsbereich/Transregio SFB/TR-09 *Computergestützte Theoretische Teilchenphysik* in Kooperation mit Gruppen der RWTH Aachen, der HU Berlin und der Uni(TH) Karlsruhe erfolgreich ein erster Verlängerungsantrag für den Förderzeitraum 2007–2010 gestellt. Antragsteller sind J. Blümlein, K. Jansen, S. Moch, R. Sommer und T. Riemann.

Es besteht eine enge Zusammenarbeit der Theoriegruppe mit der Humboldt-Universität Berlin, den Universitäten Bielefeld und Würzburg, NIKHEF, Amsterdam/NL, der Universität Leiden/NL, mit CERN, dem IPPP Durham/UK, der Universität Liverpool, dem Institut für Theoretische Physik am Harish Chandra Research Institute Allahabad/IN, dem KEK Tsukuba/J, den Universitäten Cottbus, Leipzig, Madrid, Rom II, Rom III, Münster, Hiroshima/J, Shanghai/CN, RISC, Linz/A, und USB Caracas, Y. An der Humboldt-Universität Berlin wurden Vorlesungen über *Spezielle Aspekte der Elementarteilchentheorie* und *Physik an Hadron-Beschleunigern* gehalten, und an der Universität Potsdam über *Quantenfeldtheorie* sowie eine *Einführung in die Elementarteilchen-Theorie*. Vorlesungen zu speziellen Kapiteln der Quantenfeldtheorie werden an der Universität Dortmund gehalten.

Die Forschergruppe Teilchenphysik des John von Neumann-Instituts für Computing (NIC) ist in Zeuthen angesiedelt. Die Haupt-Forschungsrichtung der Gruppe sind numerische Simulationen der Theorie der starken Wechselwirkung, der Quanten-Chromodynamik (QCD), auf einem vier-dimensionalen, diskreten Raum-Zeit-Gitter. Diese Simulationen werden auf massiv parallelen Supercomputern der höchsten Leistungsklasse vorgenommen.

Im Jahr 2006 hat die Gruppe weiter erfolgreich auf dem Gebiet der Algorithmen-Entwicklung gearbeitet, um erste, hoch-präzise und phänomenologisch relevante Ergebnisse in der Gitter-QCD zu erzielen. So konnten z. B. die skalare und tensorielle Streulänge des Pions sowie dessen (geladener) Radius bestimmt werden. Weitere Größen sind die Zerfallskonstante des Pions sowie Formfaktoren, die direkt mit phänomenologischen Analysen verglichen werden können. Ähnliche Rechnungen für den Baryon-Sektor werden zurzeit durchgeführt.

Im Jahr 2006 wurden durch neue Rechnerinstallationen die Kapazitäten des NIC deutlich erhöht. Bei den neuen Rechnersystemen handelt sich um ein Blue Gene/L-System am ZAM in Jülich mit einer Leistungsfähigkeit von über 40 Teraflops und ein apeNEXT System in Zeuthen mit einer Leistung von 3 Teraflops. Während die Rechenzeit der BG/L unter mehreren Forschungsfeldern aufgeteilt wird, steht die apeNEXT der Gitter-QCD zur Verfügung. Eine Beschreibung des apeNEXT Projektes, der von Physikern in einer Kollaboration zwischen dem INFN in Italien, DESY und der Universität Paris-Süd eigenständig entwickelt wurde, findet sich in vorangegangenen Jahresberichten, in denen auch die Eigenschaften und technologischen Besonderheiten beschrieben werden.

Beide Entwicklungen, neue Rechnersysteme und wesentlich verbesserte Algorithmen, haben es der NIC-Forschungsgruppe erlaubt, bei Parametern zu simulieren, die vor kurzer Zeit undenkbar waren. So konnten verschiedene physikalische Größen, wie das Meson-

Spektrum und die Meson-Zerfallskonstanten, Quarkmassen und Pion-Formfaktoren in einem Bereich von Pseudoskalaren Massen zwischen 300 MeV und 500 MeV berechnet werden. Dies steht in starkem Kontrast zu den bisherigen Erwartungen in der Vergangenheit, dass eine pseudoskalare Masse von 500 MeV eine untere Schranke darstellt bis zu der Gitter-QCD Simulationen realistisch sind.

Der abgedeckte Bereich der pseudoskalaren Masse erlaubt die Anwendung der chiralen Störungstheorie zur Beschreibung des Verhaltens physikalischer Größen als Funktion der Quarkmasse. Die NIC-Forschungsgruppe hat solch einen Vergleich durchgeführt und gefunden, dass die chirale Störungstheorie die numerisch gewonnenen Daten exzellent beschreibt (siehe Abbildung 65). Dies erlaubt es nun, aus den Daten die Niederenergiekonstanten der effektiven Lagrangedichte zu bestimmen. Als Ergebnis konnten die Werte bestimmter Konstanten mit einer bis dahin nicht denkbaren Präzision extrahiert werden. Diese Konstanten können nun ihrerseits dazu dienen, die skalare und tensorielle Streulänge des Pion sehr präzise zu berechnen. Wichtig ist, dass diese Streulängen im Experiment bestimmt werden können. Damit eröffnet sich eine weitere Möglichkeit, die QCD als Theorie der starken Wechselwirkung einem Präzisionstest zu unterziehen, einem Test, bei dem die Gitterresultate unerlässlich sind. Es zeigt sich, dass die QCD diesen Test mit Bravour meistert. Es sei noch bemerkt, dass die gleichen Konfigurationen, also die Rohdaten der Gittereichtheorie, auch benutzt werden können, um andere physikalisch noch interessantere Größen zu berechnen, wie etwa der B-Meson Parameter B_k oder die B-Quarkmasse. Dieses For-

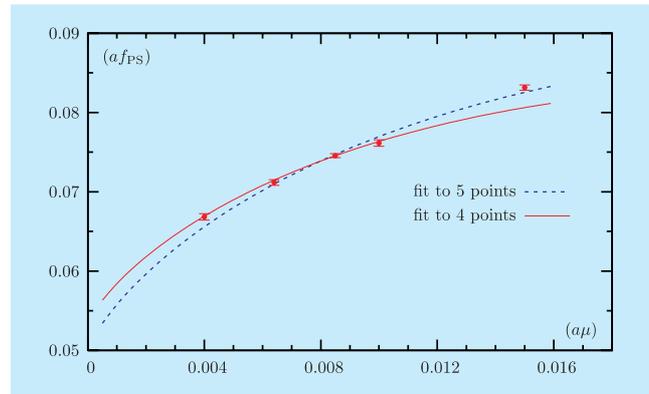


Abbildung 65: Die Zerfallskonstante des Pions af_{PS} als Funktion der Quarkmasse $a\mu$ zusammen mit einem Fit an die Vorhersage der chiralen Störungstheorie. Es werden zwei Fits gezeigt, einer bei dem alle Datenpunkte mitgenommen werden und einer, bei dem der größte Wert der Quarkmasse bei $a\mu = 0.015$ herausgenommen wurde. Die Fits erlauben eine sehr präzise Bestimmung der wichtigen Niederenergiekonstanten der chiralen Störungstheorie.

schungsprogramm wird der Schwerpunkt des Folgejahres sein.

Als weitere Aktivität hat die NIC-Forschungsgruppe eine Schule in Zeuthen, die *Lattice Practises 2006* organisiert. Ziel der Schule war es, Studenten auf dem Doktorandenniveau oder jüngere Postdocs mit modernen Techniken der Gittereichtheorie vertraut zu machen und Optimierungen von Simulationsprogrammen auf bestehenden Supercomputer-Architekturen zu vermitteln. Diese Schule war sehr gut besucht und sollte daher in regelmäßigen Abständen wiederholt werden.

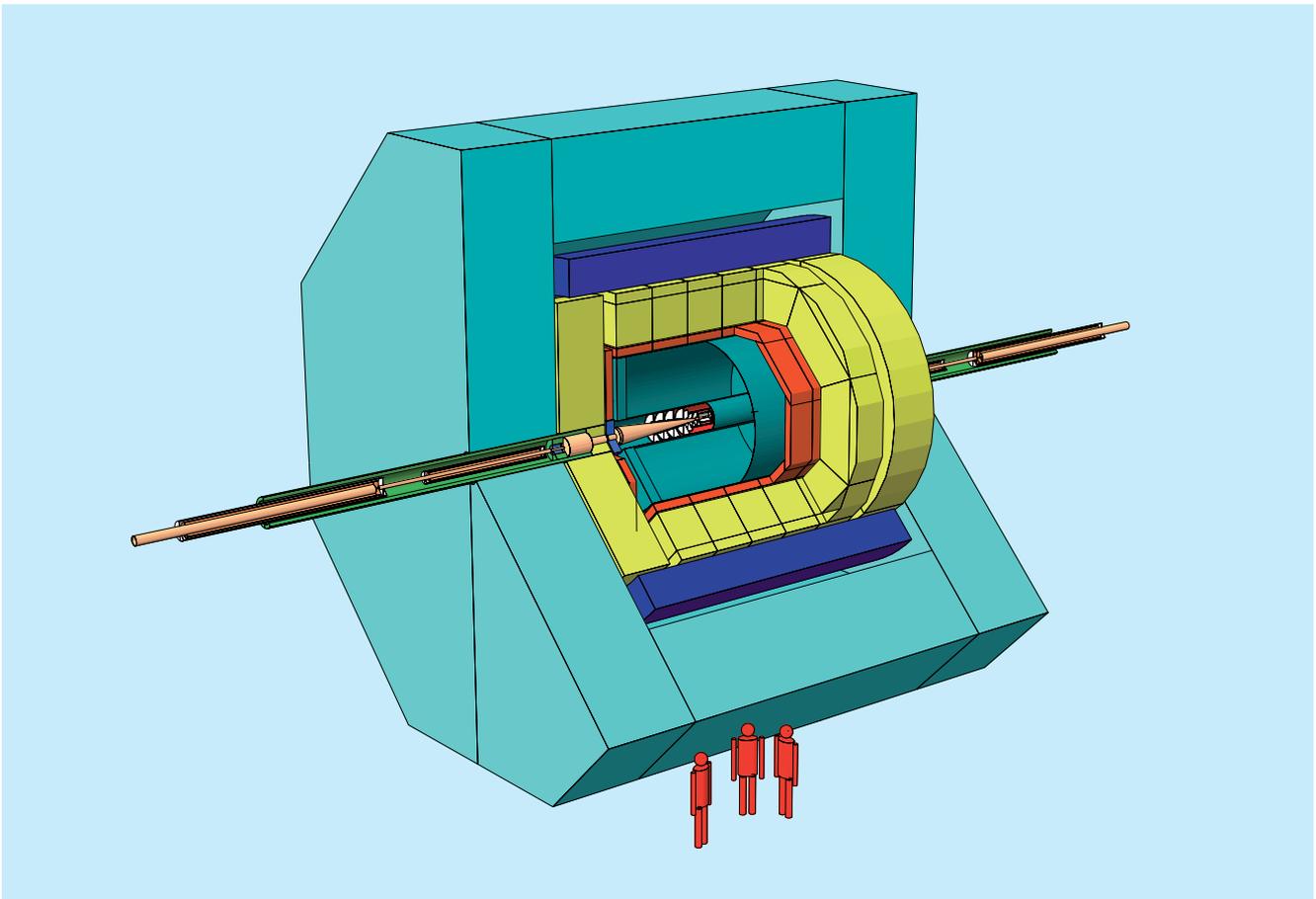


Abbildung 66: *Drei-dimensionale Zeichnung des LDC Large Detector Concept, das mit wesentlicher Beteiligung des DESY entwickelt wurde. Zentraler Spurdetektor ist eine TPC umgeben von ECAL und HCAL innerhalb des Magnetjochs, das von Muon-Kammern umgeben ist. Im Zentrum des Detektors befinden sich Halbleiter-Detektoren zur Vertex-Bestimmung, in Vorwärtsrichtung zwei weitere Kalorimeter (BeamCal und LumiCal).*

International Linear Collider

ILC-Projektgruppe: Mitglieder und Gäste der Gruppen M und FH, darunter insbesondere FLC (Leiter: T. Behnke) und LC (DESY, Zeuthen – Leiter: H.J. Schreiber), sowie etwa 66 Institute aus 17 Ländern (im Rahmen der ECFA Studie).

Sprecher: T. Behnke, E. Elsen und N. Walker, DESY

Die Projektgruppe ILC am DESY beteiligt sich in den Bereichen Theorie, Experiment und Beschleuniger an der Forschung und Entwicklung für den e^+e^- International Linear Collider (ILC). Weltweit waren die Aktivitäten für den Beschleuniger auf die Ausarbeitung des *Referenz Design Reports (RDR)* gerichtet. Im Rahmen des *Global Design Efforts (GDE)* wurde unter Leitung von Prof. B. Barish die Auslegung des Beschleunigers grundlegend überarbeitet und im RDR dokumentiert, der Ende des Jahres in seiner Rohfassung vorgelegt werden konnte. Als wichtigstes neues Element enthält dieser eine Gesamtkostenabschätzung, in die seitens DESY die Erfahrungen aus der Planung für TESLA und aus dem Planungsvorschlag für den XFEL eingebracht wurden.

Im Verlauf des Jahres konnte das Modul 6, ein mit elektropolierten Kavitäten ausgestattetes Beschleunigermodul, getestet werden. In diesem Modul waren Kavitäten nach spezieller Behandlung für Tests bei höchsten Gradienten zusammengestellt worden. Diese Tests sind nicht nur für die Serienproduktion beim XFEL interessant sondern vor allem auch für das Hochgradienten-Programm beim ILC.

Die Arbeiten an der Entwicklung von Technologien für einen Detektor am ILC haben im Berichtsjahr gute Fortschritte gemacht. DESY Mitarbeiter sind sowohl in der Entwicklung von Technologien an exponierter Stelle aktiv als auch in der Ausarbeitung eines kompletten Detektor Konzeptes beteiligt.

Im Sommer des Jahres wurde ein Bericht über das konzeptionelle Design eines solchen Detektors, des LDC (*Large Detector Concept*), fertig gestellt. Dieses so genannte *Detector Outline Document* enthält die detaillierte Beschreibung eines Detektors unter Einschluss eines Statusberichts über den Stand der technologischen Entwicklungen.

Ein wesentlicher Meilenstein in der Weiterentwicklung des hadronischen Kalorimeters konnte mit dem erfolgreichen Teststrahlexperiment am CERN im Sommer 2006 genommen werden. Dieser wichtige Schritt in technologischer Hinsicht brachte gleichzeitig die verschiedenen Gruppen aus den Bereichen des elektromagnetischen Kalorimeters, des hadronischen Kalorimeters und des Tail Catchers zusammen.

Beschleunigerentwicklungen

Überragendes Ziel des Jahres 2006 war die Ausarbeitung des *Reference Design Reports (RDR)* für den e^+e^- International Linear Collider unter Einschluss belastbarer Kostenabschätzungen. Das Team des *Global Design Efforts (GDE)* unter der Leitung von Prof. B. Barish führte die 2005 begonnenen Arbeiten mit großem Engagement weiter und konnte noch vor Weihnachten 2006 einen Entwurf präsentieren, der im Februar 2007 der Weltöffentlichkeit in Beijing vorgestellt wurde. Vorausgegangen waren zahlreiche Treffen, in denen die Auslegung der Maschine hinsichtlich Kosten

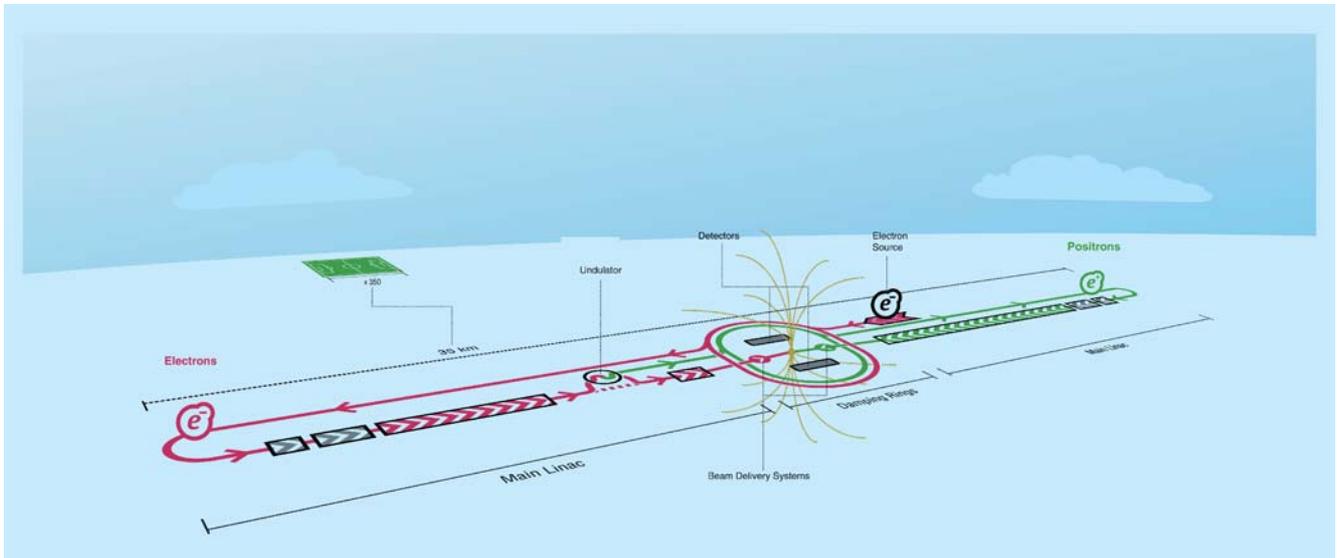


Abbildung 67: Die Auslegung des ILC in der Version für den RDR. Der zentrale Campus beherbergt jetzt Injektoren und Dämpfungsringe in unmittelbarer Nähe.

optimiert wurde. Unter diesen brachte vor allem der Linear Collider Workshop in Vancouver im Juli 2006 mehrere Änderungen auf den Weg: die beiden Dämpfungsringe wurden von ihren Positionen am Beginn der beiden Linearbeschleuniger in einen gemeinsamen, zentralen Tunnel gebracht, der Positronenring wurde nunmehr als einfacher Dämpfungsring konzipiert, Redundanzen in der Auslegung der HF-Leistung wurden ausgeräumt und die Wechselwirkungszonen wurden auf eine einzelne mit dem zugehörigen Strahlführungssystem reduziert, in die zwei verschiedene Detektoren im *Push-Pull* Verfahren eingebracht werden können, siehe Abbildung 67.

Die DESY ILC-Projektgruppe hat diese Entwicklungen mit Studien unterstützt und zu den Entscheidungen beigetragen. N. Walker leitete im GDE die Studien-Gruppe für den RDR; W. Bialowons führte zusammen mit J.L. Baldy vom CERN die Kostenabschätzungen für den ILC nach europäischem Kostenmodell durch. E. Elsen und L. Lilje haben im Forschungs- und Entwicklungs-Board (R&D Board) beigetragen, die knappen Ressourcen weltweit optimal im Verbund einzusetzen. Hier zeigt sich ein Novum in der internationalen Forschungsplanung: auch ohne zentrale Projektmitte-vergabe sind die nationalen Forschungsfördergesell-

schaften bereit, die Ausführungen des R&D Board anzuhören und umzusetzen. Dominierend war hier die Ausarbeitung eines Forschungsplans, zur Optimierung der Produktion der Kavitäten bei hohem Gradienten. Der Erfolg dieses Programms hat Einfluss auf den nutzbaren Beschleunigungsgradienten und letztlich auf die Länge und damit die Kosten des ILC.

Weitere Studien wurden vor allem im Rahmen des EUROTeV Projekts durchgeführt. Diese EU geförderte Designstudie konnte auf der EPAC06 Konferenz in Edinburgh mehr als 50 Beiträge vorlegen. Die Arbeiten haben in allen beteiligten Ländern die Bedeutung der Beschleunigerphysik deutlich herausgehoben.

Weiterentwicklung der supraleitenden Technologie

DESY nutzt beim Bau des XFEL die gleiche Beschleunigungstechnologie, die beim ILC zum Einsatz kommen soll. Die Erfahrungen aus der Serienproduktion der fast 1000 Kavitäten für den XFEL werden einen entscheidenden Beitrag zur Kostenabschätzung und Produktionsplanung für den ILC darstellen. Hinsichtlich der erforderlichen Beschleunigungsgradienten konnte

im Laufe des Jahres das Modul 6, das seit langem bei DESY in Vorbereitung war, getestet werden. Besucher vom Fermilab haben diese Tests eng verfolgt. Sechs der acht eingebauten Kavitäten konnten Beschleunigungsfelder oberhalb von 30 MV/m aufbauen, der mittlere Gradient betrug 28 MV/m. Die Ursache des Feldeinbrüche bei den beiden verbleibenden Kavitäten wird noch untersucht. Es ist damit zweifelsfrei, dass die Planungen für hohe Beschleunigungsfelder beim ILC realistisch sind – lediglich die Erfolgsquote bei der Produktion ist noch deutlich zu verbessern. In Europa fanden mehrere Arbeitstreffen statt, in denen versucht wurde, die Forschung in diesem Gebiet zu organisieren. Ein Vorschlag zur Förderung an die europäische Union im 7. Rahmenprogramm ist in Vorbereitung.

Auf der EPAC Konferenz in Edinburgh wurde L. Lilje der Beschleunigerpreis der Europäischen Physikalischen Gesellschaft (EPS) für seine grundlegenden Beiträge zum SCRF Thema verliehen.

Strahlexperimente an FLASH

Die FLASH Anlage bei DESY erlaubt neben dem Nutzerbetrieb auch Experimente am Linearbeschleuniger selbst. Ein eigenes Experiment nutzt höhere Schwingungsmodi (HOM) um auf die transversale Strahlage zurückzuschließen. Der parallele Betrieb solcher Experimente ist im verzahnten Betriebsmodus von FLASH möglich, ohne die Nutzer in den Experimentierhallen zu stören.

Positronenquelle

Ein Linearbeschleuniger, in dem sowohl Elektronen als auch Positronen polarisiert sind, hat ein besonders breites Physikpotenzial. Allerdings ist im Gegensatz zur Erzeugung polarisierter Elektronen durch Photoemission an GaAs-Strukturen die Erzeugung eines intensiven polarisierten Positronenstrahls deutlich schwieriger.

Eine favorisierte Methode beruht auf einer Idee von Balakin und Mikhailichenko aus dem Jahre 1979: ein hochenergetischer Elektronenstrahl wird durch einen

wendelförmigen Undulator geschickt. Dabei entsteht ein Strahl zirkular polarisierter Photonen, der auf ein dünnes Target trifft und Elektron-Positron Paare erzeugt. Fängt man mit der nachfolgenden Strahloptik lediglich die hochenergetischen Positronen ein, erwartet man einen Positronenstrahl mit einem Polarisationsgrad von bis zu 60%.

Mit dem E166-Experiment am Stanford Linear Accelerator (USA) wurde erstmals die Produktion polarisierter Positronen mit einem wendelförmigen Undulator experimentell demonstriert. Der Polarisationsgrad der erzeugten Positronen wird mit einem Comptontransmissionspolarimeter gemessen. Es besteht aus einem Analysiermagneten (Verantwortung DESY, Hamburg) und einem CsJ(Tl) Kalorimeter (Verantwortung DESY, Zeuthen). Die polarisierten Positronen werden in einem Target in Photonen zurückkonvertiert. Die polarisierten Photonen werden dann in einem magnetisiertem Eisentarget gestreut. Die Polarisation der Positronen wird aus der gemessenen Asymmetrie der Signale im CsJ(Tl)-Kalorimeter hinter dem Eisen Target bestimmt.

Im Jahr 2005 wurde der wendelförmige Undulator in Betrieb genommen und das Messprogramm erfolgreich durchgeführt. Die Messungen der Asymmetrien stimmen gut mit den Erwartungen überein, die vorläufigen Resultate sind in Abbildung 68 zusammengefasst. Zum Vergleich wurde außerdem die Asymmetrie für Elektronen bei 7 MeV gemessen, die im Target bei der Paarbildung entstehen. Die Bestimmung des Polarisationsgrades der Positronen aus den gemessenen Asymmetrien erfordert eine detaillierte Simulation der Prozesse von der Erzeugung der Photonen im Undulator, der Positronen im Target sowie der Messung der Polarisation im Transmissionspolarimeter. Zu diesem Zweck wurde das Simulationspaket GEANT4 um die entsprechenden polarisationsabhängigen Beiträge erweitert. Diese Erweiterungen des GEANT4 Paketes, die in Zusammenarbeit mit NCHEP Minsk durchgeführt wurden, sind inzwischen in die offizielle GEANT Version aufgenommen worden.

Umfangreiche Rechnungen zur Strahlenbelastung hinter dem Target und zur erforderlichen Kollimation wurden durchgeführt. Die Rechnungen zeigen, dass vor

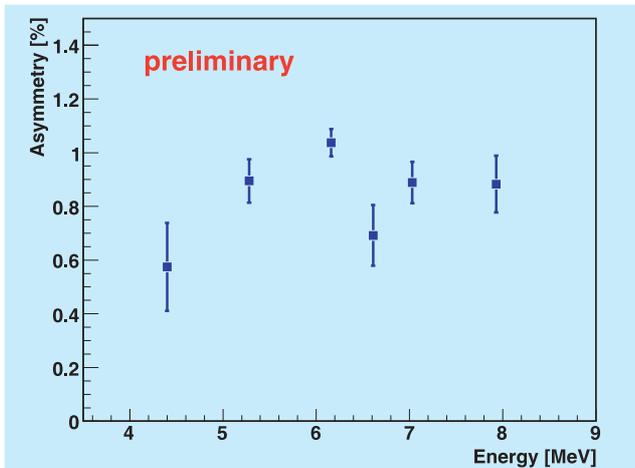


Abbildung 68: Die Asymmetrien gemessen mit dem Comptontransmissionspolarimeter bei E166 in Abhängigkeit von der Energie der Positronen. Die Energie wurde mit einem Doppeldipolspektrometer eingestellt. Aus den Asymmetrien kann die Polarisation der Positronen berechnet werden, wenn die Analysing Power der Apparatur mit einer Monte Carlo Simulation bestimmt wurde.

allem durch Neutronenfluss der Targetbereich radioaktiv belastet wird und durch eine 90 cm dicke Betonwand abgeschirmt werden muss. Das Target selbst kann nur mit einem ferngesteuerten Positionierungssystem bewegt werden. Der Austausch eines Targets ist mit relativ großem Aufwand verbunden.

Die Anforderungen an die Präzision der Messung der Polarisation der Strahlen am Wechselwirkungspunkt (0.25%) sind beispiellos. Daher wurde damit begonnen, ausgehend von einem Entwurf, der dem bisher genauesten Polarimeter beim SLD-Experiment ähnelt, einen geeigneten Detektor zu entwerfen und einen Teststand für Komponenten aufzubauen. Insbesondere sollen neben den bei SLD verwendeten konventionellen Photonenvervielfachern die für das hadronische Kalorimeter eingesetzten Silizium-Photomultiplier in Hinblick auf einen möglichen Einsatz im Polarimeter überprüft werden. Begleitend zum Aufbau des Teststandes wurde ein Simulationsprogramm für das gesamte Polarimeter entwickelt, wobei verschiedene Varianten des Detektors implementiert sind. Neben dem eigentlichen Detektor werden die Compton-Streuung

von Laser- und Elektronenstrahl sowie das Magnet-spektrometer für die gestreuten Elektronen berücksichtigt.

Dämpfungsringe

Der *Baseline Design Report* des Jahres 2005 ging von zwei Dämpfungsringen jeweils am Startpunkt der Linearbeschleuniger aus, wobei der Ring der Positronen auf einer Länge von 12 km als Doppelring in einem 6 km langen Tunnel ausgeführt war. Detaillierte Studien zum gefürchteten *electron cloud* Effekt ermutigten die Arbeitsgruppe, eine riskantere Variante vorzuschlagen, in denen die Positronen in einem einzelnen 6 km langen Ring „gekühlt“ werden. Hintergrund war, dass durch Auslegung der Vakuumkammern die Emission von Sekundärelektronen deutlich reduziert werden konnte. Letzte Zweifel im Bereich der Wiggler, in denen auch elektrische Löschfelder keine Lösung bieten können, verbleiben und Planungen für Messläufe an bestehenden Maschinen sind im Gange. Die zweite Vereinfachung ergab sich durch räumliche Zusammenlegung der e^+ und e^- Ringe in einem gemeinsamen Tunnel. Für Elektronen wird andererseits befürchtet, dass entstehende Ionen-Ladungswolken sich im Potential des gespeicherten Strahls schon nach Durchgang eines Pulszugs sammeln können und defokussierend den Strahl aufweiten könnten. DESY hat sich an den Rechnungen zu diesem Effekt besonders beteiligt und hat zusammen mit anderen Instituten einen Testlauf am ATF-Ring in Japan vorgeschlagen. Diese Experimente sind für das Jahr 2007 geplant.

Strahltransport

DESY unterstützt mit mehreren Postdocs im Rahmen des EUROTeV Programms Studien zum Strahltransport und zur Bewahrung der extrem kleinen Emittanz im Linac. Diese Werkzeuge wurden im Jahr 2006 vor allem genutzt, um zu untersuchen, unter welchen Bedingungen bei technischen Ausfällen der Strahl verloren gehen kann. Solche Studien zu Fehlerszenarien sind wichtig, wenn es um die Planungen von schnellen

Strahlejektionssystemen geht. Die vorgelegten Studien zeigen, dass bei Ausfällen von Magneten der Strahl in der Regel so aufgeweitet wird, dass die Ladungsdichte genügend reduziert ist, um Schäden am Vakuumsystem zu verhindern und genügend Zeit bleibt, nachfolgende Strahlpakete nicht auf die Beschleunigungsstrecke zu bringen. Weitere Studien sind in diesem Bereich geplant, wie das Thema der Emittanzbewahrung weiterhin von Wichtigkeit bleiben wird. DESY betreut ein größeres Programmsystem (Merlin), mit dem sich solche Studien effizient durchführen lassen.

Positionsstabilität von Beschleunigerkomponenten

Eine ebenfalls von EUROTeV geförderte Arbeitsgruppe bei DESY befasst sich seit Jahren mit Fragen der Bodenbewegungen und Stabilität von Beschleunigerkomponenten. Im Berichtsjahr wurden jetzt speziell Fragen angegangen, die sich auf die Stabilität des SC-Quadrupols im Kryomodul beziehen. Kleine Bewegungen dieser Komponente können einen großen Einfluss auf die Strahlage haben. Solche Messungen sind unter realistischen Betriebsbedingungen möglich, die auch den Eintrag externer Rauschquellen berücksichtigen.

Von der gleichen Arbeitsgruppe wurden Messungen am HERA-Tunnel durchgeführt. Diese zeigten, dass eine Aufhängung der Beschleunigungskomponenten an der Decke des Tunnels möglich ist, ohne dass es zu zusätzlichen Instabilitäten Anlass gibt. Diese Aufhängungsart lässt die Zugangswege auf dem Tunnelboden frei und wird gegenwärtig vom XFEL favorisiert.

Messung der Strahlenergie

Um die Masse von Teilchen wie z. B. dem Higgs-Boson oder dem Top-Quark mit hoher Genauigkeit messen zu können, ist die Kenntnis der Strahlenergie (E_b) von 10^{-4} oder besser notwendig.

Die Standardmethode zur Bestimmung von E_b ist die Nutzung eines Magnetspektrometers bestehend aus Dipolmagneten und Strahllagemonitoren (BPMs) mit sehr

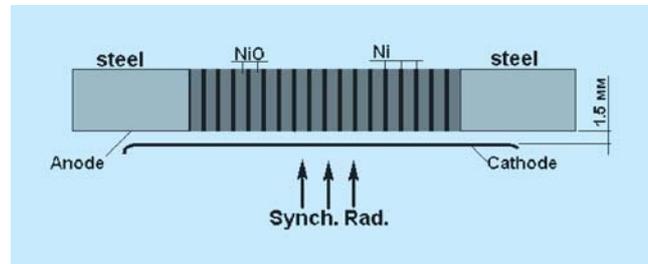


Abbildung 69: Schema eines Gasverstärkungs-Detektors zur Messung der Endpunkte der Synchrotron-Strahlung mit hoher Genauigkeit.

hoher Positionsgenauigkeit. Um nachzuweisen, dass eine solche Präzisionsmessung unter realistischen Bedingungen möglich ist, wurde ein Experiment am SLAC (USA) (Experiment T-474) aufgebaut, in dem systematische Untersuchungen von hochauflösenden BPMs im April und Juli durchgeführt wurden. Mit S-Band Monitoren vom SLAC konnte eine Einzelbunchauflösung von 550 nm über einen Bereich von ± 1.2 mm gemessen und eine Stabilität von besser als 40 ppm über einen Zeitraum von 30 Minuten beobachtet werden. Weitere Messungen mit anderen Magneten sind im Jahre 2007 geplant.

Neben der Möglichkeit die Strahlenergie mittels Magnetschikane zu messen, werden in Zeuthen komplementäre Methoden zur Bestimmung von E_b betrachtet. Gemeinsam mit russischen Kollegen aus Dubna ist die Methode basierend auf Monitoring von Synchrotron-Strahlung (SR), die in den Magneten der Schikane erzeugt wird, eingehend betrachtet worden. Ein Beispiel eines solchen Detektors ist in Abbildung 69 schematisch gezeigt.

Darüberhinaus scheint sich die Messung der Strahlenergie mittels Comptonstreuung als weitere attraktive Alternative zur Magnetschikane zu entwickeln.

Die Möglichkeit der Messung der Strahlenergie mittels Resonanzabsorption von Laserlicht in einem statischen Magnetfeld, vorgeschlagen von Kollegen in Yerevan, wurde weiter verfolgt. Details hierzu finden sich im DESY Jahresbericht 2005. Trotz einer Reihe offener Probleme strebt Yerevan mit Unterstützung von DESY ein *proof-of-principle* Experiment in 2007 und 2008 am dortigen Beschleuniger an.

Diese hier aufgezeigten Möglichkeiten zur Bestimmung der Strahlenergie werden gemeinsam mit Kollegen in Dubna, Yerevan und Novosibirsk untersucht. Sie dienen in erster Linie als Messung der Strahlenergie komplementär zur Bestimmung von E_b mit Hilfe eines auf Strahllagemonitoren basierenden Spektrometers.

Global Accelerator and Detector Network

Die EUROTeV Arbeitsgruppe zur Fernauslese, -steuerung und -kommunikation konnte im Laufe des Berichtsjahres erste Erfahrungen mit einem Prototyp-System sammeln. Bei Testmessungen für das Kalorimeter am CERN wurden die in der Arbeitsgruppe entwickelten Techniken eingesetzt und erfolgreich genutzt. Ziel dieses Programms ist es, neben dem Zugriff auf die Instrumente, durch Audio- und Videotechnik den Eindruck einer virtuellen Präsenz im entfernt gelegenen Kontrollraum zu schaffen.

Physikalische Studien zum ILC

Physikalische Studien zum ILC haben in den letzten Jahren eine gewisse Reife erreicht. Im *Detector Concept Report* (DCR), dem experimentellen Gegenstück zum RDR, wird der Stand der Studien zusammengefasst. Am DESY wurden verschiedenen Analysen im Berichtszeitraum verfolgt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die Untersuchung des Higgs Bosons ist eines der wichtigsten Ziele am ILC. Bei niedrigen Massen wird dieses Teilchen primär im Higgs Bremsstrahlungsprozess produziert. Hierbei zerfällt ein virtuelles Z-Boson in ein reelles Z-Boson und ein Higgs Boson. Aus der Rekonstruktion der Masse des Z's können die Eigenschaften des Higgs Bosons bestimmt werden, ohne Annahmen über den Zerfall des Higgs selber machen zu müssen. In einer detaillierten Studie konnte die Abhängigkeit der zu erzielenden Auflösung bei der Bestimmung der Higgs Masse von der Schwerpunktesenergie nachge-

wiesen werden. Es stellt sich heraus, dass die genaueste Bestimmung der Higgs Masse eben über der Produktionsschwelle möglich ist.

Gemeinsam mit der Staatlichen Universität Moskau wurde eine Studie zur Suche eines Teilchens fortgeführt, das dem Photon im Standard Modell sehr ähnlich ist. Dieses in bestimmten Erweiterungen des Standard Modells vorhergesagte Teilchen, das sogenannte Paraphoton, sollte bevorzugt vom Top-Quark emittiert und durch seine vernachlässigbare Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie nachgewiesen werden. Bedingt durch hohen Untergrund, kleinem Signal und Variablen mit geringer Unterscheidungskraft zwischen Signal und Untergrund war nur eine multidimensionale Analyse bei 1 TeV Schwerpunktesenergie in der Lage, einen signifikanten Nachweis zu erbringen bzw. eine Grenze der Paraphoton-Top-Quark Kopplung anzugeben.

Auf dem Gebiet der physikalischen Untersuchungen im Rahmen von SUSY Modellen konzentrierten sich die Arbeiten auf den Bereich der Analyse von skalaren Top-Quarks in der Coannihilationsregion. Zum Verständnis der Baryogenese werden skalare Top-Quarks benötigt, die leichter als das Top-Quark sind und am ILC sehr gut gefunden und untersucht werden können. Ihre Masse kann mit einem Fehler von 1 GeV, also rund 1%, gemessen werden. Die Arbeit wurde gemeinsam mit Physikerinnen und Physikern vom Fermilab und aus Lancaster durchgeführt.

In einer anderen Studie wurde untersucht, wie die in manchen supersymmetrischen Modellen vorausgesagten sehr langlebigen Teilchen nachgewiesen werden können. In solchen Modellen werden Teilchen produziert, die schwer sind, und eine sehr lange Lebensdauer haben. Sie werden im Detektor „abgebremst“, existieren für eine endliche Zeit im Detektor, und zerfallen dann. Die fein aufgeteilten Kalorimeter, die am ILC vorgeschlagen werden, sind sehr gut geeignet, solche Zerfälle experimentell nachzuweisen. Eine erste Studie basierend auf einer parametrisierten Detektorsimulation wurde durchgeführt, und zeigte, dass ein Nachweis prinzipiell möglich sein sollte. Detailliertere Studien mit voller Simulation und realistischen Annahmen über

Detektoren sind allerdings notwendig, bevor endgültige Aussagen gemacht werden können.

Eine neue Serie von Studien beschäftigt sich mit dem Potential des ILC in Bezug auf Kandidaten für Dunkle Materie, insbesondere sogenannte WIMPs (*weakly interacting massive particles*).

Ziel der Studien ist es, möglichst modellunabhängig die Paarproduktion von WIMPs zu untersuchen. Ausgehend von einer zur im Universum beobachteten Restdichte von dunkler Materie passenden Rate für die Paarvernichtung zweier WIMPs in Standardmodell-Teilchen wird via Zeitumkehrinvarianz eine Vorhersage für die Paarproduktion von WIMPs in Elektron-Positron-Kollisionen in Abhängigkeit von WIMP-Masse, -Spin, Drehimpuls der dominanter Partialwelle sowie Stärke und Händigkeit der Kopplung an Elektronen abgeleitet. Damit wird ein weites Spektrum an möglichen WIMP-Kandidaten abgedeckt, ohne ein spezifisches Modell, wie z. B. Supersymmetrie und dessen Parameter, zugrundelegen zu müssen. Diese Studien, die die volle GEANT4-Simulation des LDC-Detektorentwurfs und die MARLIN-Rekonstruktion verwenden, zeigen, dass auf diese Art und Weise WIMPs mit Massen von ca 100 bis 200 GeV bei unpolarisierten Strahlen am ILC beobachtet werden können, solange der Anteil von WIMP-Paarvernichtung in Elektron-Positron-Paare mindestens 20 bis 30% beträgt. Mit 80% Elektron- und 60% Positron-Polarisation reduziert sich dieser nötige Anteil um einen Faktor 5 bis 10, je nach Spin der WIMPs und Händigkeit der Kopplung. Wenn WIMPs am ILC erzeugt werden, dann könnte mit diesem modellunabhängigen Ansatz ihre Masse mit unpolarisierten Strahlen bis auf einige Prozent genau gemessen werden, erheblich genauer, wenn beide Strahlen polarisiert sind.

Maschine-Detektor Schnittstelle

Die Schnittstellen zwischen den geplanten Experimenten und dem Beschleuniger sind wichtiger Gegenstand der weltweiten Studien zum ILC. Im Berichtszeitraum standen dabei vor allem Studien zu den Kreuzungswin-

keln, der Zahl der Wechselwirkungszonen, dem Design der unterirdischen Hallen für die Detektoren, sowie zu Themen der Strahldiagnose mit direktem Einfluss auf die physikalische Leistungsfähigkeit des ILC im Vordergrund. Um die Kommunikation zwischen den Beschleunigerphysikern und den Experimentatoren zu verbessern, hat der ILC *Global Design Effort* GDE zusammen mit der *Worldwide Study for Physics and Detectors* ein gemeinsames Forum, das MDI Panel, geschaffen, in dem Vertreter aus den Detektorkonzeptstudien zusammen mit den Designern der relevanten Beschleunigerkomponenten die entsprechenden Fragen diskutieren.

Am DESY wurden im Berichtszeitraum schwerpunktmäßig Untersuchungen zur Detektorintegration und den sich daraus ergebenden Randbedingungen für das Design der Detektorhalle durchgeführt. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf Simulationsstudien zu den erwarteten strahlinduzierten Untergründen im LDC Detektor. Hierbei wurde insbesondere der Einfluss der diskutierten ILC Strahlparametersätze und der Wahl der Kreuzungswinkel auf die Untergrundraten studiert.

Detektorintegration und Detektorhalle

Die Planungen zur Größe und Ausstattung der unterirdischen Detektorhallen stehen in enger Wechselwirkung zu den Planungen der Detektorintegration in den Detektorkonzeptstudien. Im Laufe der Entwicklungen für den ILC RDR wurden dabei die Rahmenbedingungen, nicht zuletzt ausgelöst durch die erforderlichen Kostenreduktionen, während des Berichtszeitraums verändert. Wichtigster Punkt für die Detektorintegration war dabei die Entscheidung, zwei Experimente am ILC nicht mehr durch zwei Strahlführungen zu unterstützen, sondern beide Experimente in zeitlicher Abfolge an einer Strahlführung zu betreiben. Dies erfordert eine schnelle und vor allem sichere und stabile Bewegung des Detektors aus einer Parkposition in der unterirdischen Halle in die Messposition am Strahl. Der Austausch der beiden Detektoren muss dabei so schnell erfolgen, dass die Luminositätsverluste möglichst klein bleiben. Wenn man z. B. einen regelmäßigen Wech-

sel zwischen beiden Experimenten auf Zeitskalen von etwa monatslänge voraussetzt, erfordert dies ein Austauschen der Detektoren in einem Zeitrahmen von etwa einem Tag. In dieser Zeit muss der eine Detektor sicher abgekabelt und aus dem Strahl heraus bewegt werden, während der andere Detektor in die Strahlposition gefahren und dort wieder angeschlossen wird. Dies stellt schwierige Herausforderungen an das Design der Experimente, gerade im Hinblick auf Stabilität der Alignierung, Kalibrationsverfahren und technische Lösungen für das Bewegen der mehrere tausend Tonnen schweren Objekte.

Die Größe der unterirdischen Halle ist mit $36 \times 120 \text{ m}^2$ für zwei Detektoren ausgelegt. Es wird dabei angenommen, dass der Zusammenbau der Detektoren im wesentlichen in dedizierten Hallen an der Oberfläche stattfindet. Die vorkonfigurierten Detektorteile werden dann mit einem stationären Kran in die unterirdische Halle gebracht. Dort erfolgt dann nur noch der Zusammenbau der einzelnen großen Komponenten.

Studien zum strahlinduzierten Untergrund

Der für das Design der Detektoren relevante strahlinduzierte Untergrund am ILC wird seit Jahren in Simulationsstudien untersucht. Durch Änderungen im Design der Maschine, insbesondere bei den Strahlparametern und bei den Kreuzungswinkeln, müssen die Folgen für die Leistungsfähigkeit der Detektoren ständig neu überprüft werden.

Hauptuntergrund beim ILC werden die Elektron-Positron Paare sein, die aus Kollisionen mit Photonen der sogenannten Beamstrahlung entstehen. Diese hochenergetischen Photonen entstehen, wenn die sehr stark fokussierten ILC Teilchenpakete kollidieren. Die Elektron-Positron Paare aus der Beamstrahlung erzeugen signifikanten Untergrund in der Vorwärtsregion des Detektors. Diese Regionen werden deswegen entsprechend entworfen, um die Rückstreuung von Sekundärteilchen in das Spursystem des Detektors zu verhindern.

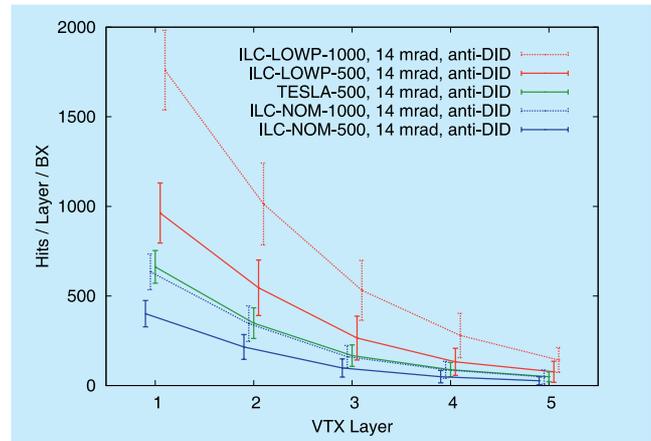


Abbildung 70: Zahl der Treffer auf den Lagen des Vertexdetektors für die nominellen und die LowP ILC Strahlparametersätze bei Schwerpunktsenergien von 500 und 100 GeV. Zum Vergleich sind auch die Zahlen für die TESLA Parameter bei 500 GeV dargestellt.

Die empfindlichste Detektorkomponente ist dabei der Vertexdetektor, dessen innerste Lage einen Abstand von nur 1.5 cm zum Wechselwirkungspunkt hat. Abbildung 70 zeigt als Ergebnis einer vollständigen Detektorsimulation die Zahl der Treffer auf den fünf Vertexdetektorlagen, die durch die Elektron-Positron Paare und die von ihnen induzierten Sekundärteilchen verursacht werden.

Die mit *LowP* bezeichneten Strahlparametersätze bezeichnen eine Option, bei der der ILC nur mit der Hälfte der nominellen RF-Versorgung ausgerüstet wird. Die Luminosität wird dann durch stärkeres Fokussieren der Strahlpakete erreicht. Dabei entstehen mehr Elektron-Positron Paare aus der Beamstrahlung, was zu einer deutlichen Erhöhung der Untergrundzahlen im Vertexdetektor führt.

Abbildung 71 zeigt ein weiteres Ergebnis der Untergrundsimulationen. In der zentralen Zeit-Projektionskammer (TPC) des LDC Detektors ist die radiale Verteilung der Treffer gegen die Zeit nach der Kollision zweier Strahlpakete dargestellt. Man erkennt einige Treffer, die unmittelbar nach der Kollision in der TPC auftreten. Dies sind Spuren, die von Paaren erzeugt werden, die vom Wechselwirkungspunkt kommend unter

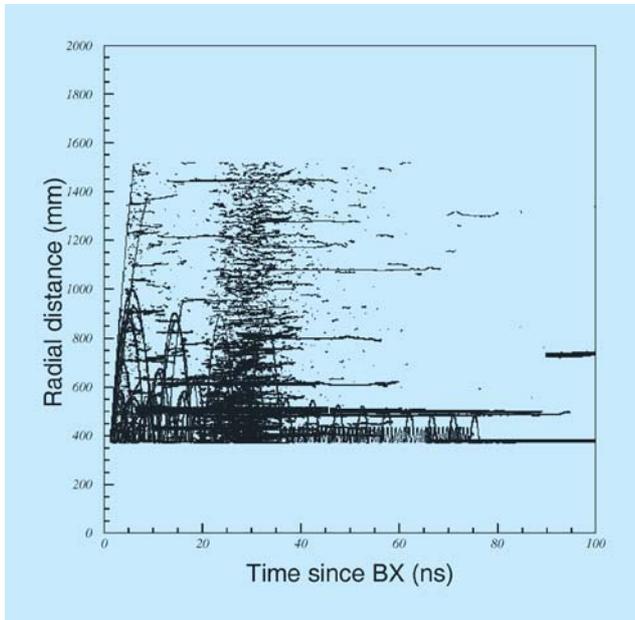


Abbildung 71: Radiale Verteilung der Treffer in der TPC aufgetragen gegen die Zeit nach der Kollision zweier Strahlpakete.

größeren Transversalimpulsen direkt in die TPC eintreten. Nach etwa 20 ns tritt eine deutliche Häufung von Spuren auf. Dies sind Spuren, die von rückgestreuten Photonen ausgelöst werden. Die Photonen entstehen in der Vorwärtsregion des LDC-Detektors und streuen in die TPC hinein. Einige Photonen können beim Passieren der TPC, beispielsweise durch den Compton-Effekt, in geladenen Teilchen konvertieren. Die erzeugten Elektronen haben sehr niedrige Energien und werden deshalb im hohen magnetischen Solenoidfeld auf horizontale Bahnen aufgewickelt. Man erkennt die horizontalen Spuren in der TPC sehr gut in der Abbildung.

Ebenfalls gut erkennbar ist, dass einige Spuren vergleichsweise spät nach den Teilchenkollisionen auftreten. Dies ist z. B. durch die Anregung und den späten Zerfall von Atomkernen im Detektormaterial zu erklären.

Detektorentwicklung für den ILC

Das geplante Experimentierprogramm am ILC soll von zwei Detektoren durchgeführt werden. Vier internationale Gruppen entwickeln im Moment Konzepte für diese Detektoren, die sich konzeptionell und technologisch stark unterscheiden. DESY ist an führender Stelle am LDC (*Large Detector Concept*) beteiligt. LDC versucht, einen optimierten Detektor zu entwickeln, der sehr stark die Rekonstruktion der Topologie der ILC Ereignisse betont. Dies bedeutet, dass neben dem bei allen Konzepten vorhandenen hochauflösenden Vertex Detektor ein Spurdetektor vorgesehen ist, der auf extreme Effizienz der Spurrekonstruktion optimiert ist, und sehr fein aufgeteilte Kalorimeter benötigt werden. DESY arbeitet an der Entwicklung von Pixeldetektoren, der zentralen Spurkammer, und verschiedenen Aspekten des Kalorimetersystems.

Pixeldetektoren

Im Berichtszeitraum wurden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Monolithischen Aktiven Pixeldetektoren (MAPS) für einen zukünftigen Linearbeschleuniger weiter ausgeweitet. Die zentralen Fragen, die in diesem Zusammenhang bearbeitet wurden sind:

- Wie können Detektoren mit minimalem Aufwand gekühlt werden?
- Ist es möglich Teile der Ausleseelektronik in der Pause zwischen Strahlpaketen auszuschalten?
- Wie verändern sich die Eigenschaften der Sensoren unter Bestrahlung?

Die Beantwortung dieser Fragen hat zum Ziel, in einigen Jahren einen Vertexdetektor mit bisher unerreichter Präzision bauen zu können. Die Arbeiten werden mit Sensoren durchgeführt, die am Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Strassbourg entwickelt werden. Diese Sensoren vereinen aktives Material und Ausleseelektronik auf ein und demselben Silizium-Chip. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden diskutiert.

Bei Untersuchungen zur Kühlung geht man davon aus, dass die Sensoren eines zukünftigen Vertexdetektors bis zu einer Dicke von 30–50 μm gedünnt werden. Die Motivation dabei ist, den zu messenden Teilchen so wenig Material wie möglich in den Weg zu stellen. Allerdings produziert die auf den Chips integrierte Elektronik Wärme, die durch aktive Kühlung abgeführt werden muss. Um die Qualität des Detektors nicht zu kompromittieren muss diese Kühlung mit sehr wenig zusätzlichem Material auskommen. Es wurde eine Lösung entwickelt und untersucht, die mit einer Verdampfungskühlung und dem Kältemittel R134a in sehr dünnen Röhrcchen ($d = 0.65 \text{ mm}$) arbeitet. Nach sorgfältiger Optimierung der Anlage konnte gezeigt werden, dass mit dieser Methode eine effektive Kühlung möglich ist, wie in Abbildung 72 gezeigt ist.

In einem supraleitenden Linearbeschleuniger erreicht der Arbeitszyklus weniger als 1%. Konkret bedeutet dies, dass auf eine Abfolge von Strahlpaketen eine Pause folgt, in der die Energie der Beschleunigungsstrecken erneuert werden kann. Das Problem der Kühlung des Vertexdetektors lässt sich verringern, wenn man wesentliche Teile der Elektronik in diesen Pausen abschaltet. Allerdings ist es nicht offensichtlich, dass stabiler Betrieb von Pixeldetektoren möglich ist, wenn diese 5–10 mal pro Sekunde für einen Zeitraum von 1 ms ein- und ausgeschaltet werden. Zur Untersuchung dieser Frage wurde die Ausleseelektronik für MAPS Detektoren derart verändert, dass sie mit einer Frequenz von 5 Hz geschaltet werden kann. Damit wurde

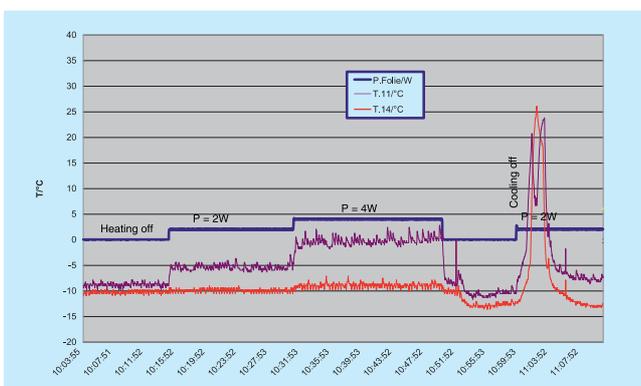


Abbildung 72: Temperatur eines gekühlten CMOS Chips mit und ohne Kühlung.

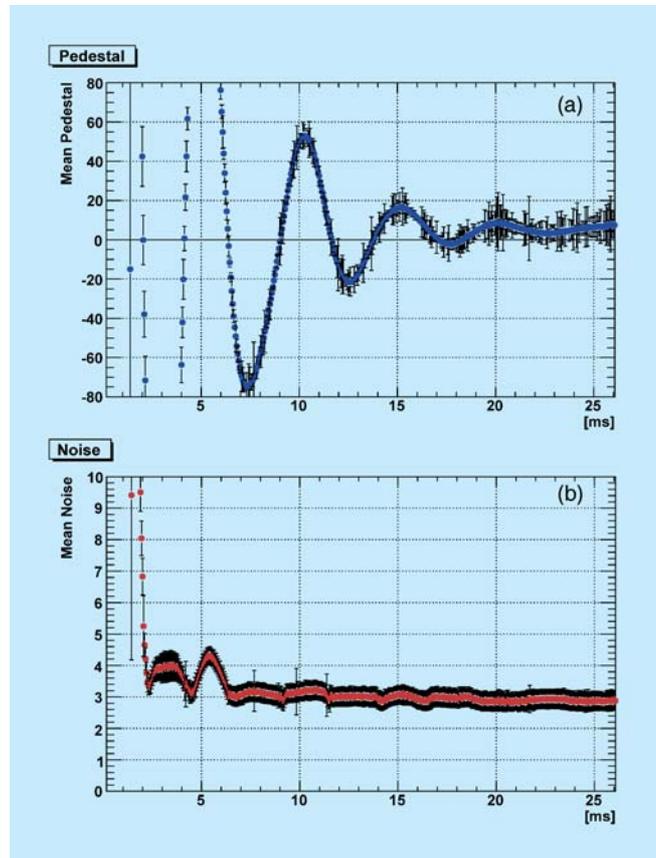


Abbildung 73: Pedestal (a) und Rauschen (b) eines MAPS Chips nach der Bestrahlung mit niederenergetischen Elektronen.

untersucht, wie lange man nach dem Einschalten warten muss, bis der Sensor stabil ist. Ein Ergebnis dieser Studien ist in Abbildung 73 dargestellt. Dort sieht man, dass das Pedestal (73a) des Sensors 20 ms lang nach dem Einschalten schwingt. Allerdings beruhigt sich das Rauschen (73b) bereits nach 1–2 ms auf ein Niveau, das mit dem bei ununterbrochenem Betrieb vergleichbar ist. Somit konnte gezeigt werden, dass MAPS Sensoren nur 1–2 ms vor dem Eintreffen eines Zuges von Strahlpaketen eingeschaltet werden müssen. Das bedeutet, dass sich auf diesem Wege die Abwärmeleistung eines Vertexdetektors an einem supraleitenden Linearbeschleuniger um einen Faktor 50–100 verringern lässt.

Schließlich wurde das Verhalten von MAPS Chips nach Bestrahlung mit hohen elektromagnetischen Dosen untersucht. Dabei wurde versucht, die Effekte der



Abbildung 74: Ein MAPS Chip während der Bestrahlung mit Elektronen bei der GSI in Darmstadt

Beamstrahlung, d. h. der niederenergetischen Elektronen und Positronen, zu simulieren. Entsprechend wurde ein MAPS Chip bei der GSI in Darmstadt mit Raten von 10^{13} Elektronen/cm² bei einer Energie von ca. 9 MeV bestrahlt und anschließend im 6 GeV/c Elektronenteststrahl bei DESY untersucht. Abbildung 74 zeigt den Chip während der Bestrahlung. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass insbesondere das Rauschen nach Bestrahlung deutlich zunimmt, während die Signale recht stabil sind. Somit verschlechtert sich das Verhältnis von Signal zu Rauschen von 24 für einen unbestrahlten Chip zu 16 für den Chip nach Bestrahlung. Entsprechend verschlechtert sich auch die Ortsauflösung um etwa 30%. Der bestrahlte Chip wäre allerdings weiterhin, wenn auch mit etwas verschlechterten Eigenschaften, benutzbar. Hier soll noch hinzugefügt werden, dass die Strahlendosis bei dieser Untersuchung erheblich über der beim Betrieb eines Vertexdetektors zu erwartenden liegt.

Zeit-Projektions Kammer

Das LDC (*Large Detector Concept*) eines Detektors am ILC sieht als zentralen Spurdetektor eine Zeit-Projektionskammer (*Time Projection Chamber, TPC*) vor. Seit mehreren Jahren finden am DESY in enger Zusammenarbeit mit mehreren deutschen Universitäten

Entwicklungsarbeiten zu einer solchen Kammer statt. Die Anforderungen an Genauigkeit, Zuverlässigkeit und auch Preiswürdigkeit dieses Gerätes lassen den Einsatz am ILC von konventioneller Technologie der Auslese einer TPC mit einer Drahtkammer nicht zu. Stattdessen wird der Einsatz von *Micro Pattern Gas Detectors* (MPGD) intensiv studiert. Diese Detektoren, die Gasverstärkungselemente einer Größenordnung von einigen 10 μm aufweisen, versprechen, exzellente Auflösung mit großer Zuverlässigkeit und gleichzeitiger effizienter Produktion zu verbinden.

Am DESY werden *Gas Electron Multiplier* (GEM) als eine mögliche Option untersucht. Dazu wurde in den vergangenen Jahren eine Testkammer gebaut und in Betrieb genommen, über deren Parameter bereits in den letzten Jahresberichten berichtet wurde. Diese Kammer wurde im Jahre 2006 intensiven Tests an Teilchenstrahlen am DESY ausgesetzt.

Ein zentraler Parameter ist die Punktauflösung, die mit der Kammer erreicht werden kann. Messungen und systematischen Studien am Elektron Strahl am DESY und mit kosmischen Strahlen haben gezeigt, dass eine Auflösung von etwa 100 μm , weitgehend unabhängig von der Driftlänge, in einem magnetischen Feld von 4 Tesla erreichbar ist. Dies ist in Abbildung 75 gezeigt, in der die gemessene Punktauflösung senkrecht zur Drift-Richtung der Elektronen in der Kammer als Funktion der Driftlänge gezeigt wird. Die Analyse dieser Daten

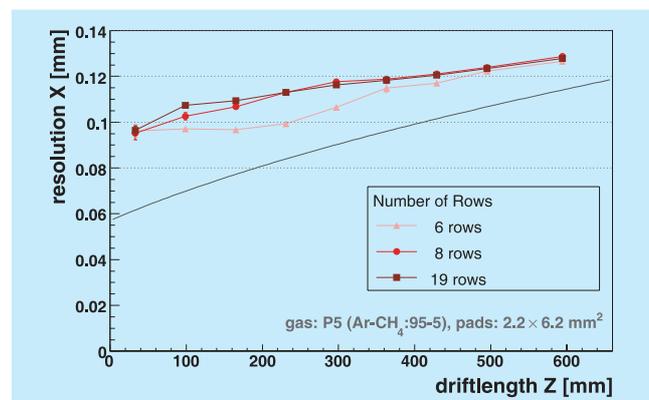


Abbildung 75: Gemessene Auflösung in der Prototyp TPC für verschieden viele Messpunkte entlang der Spur, als Funktion der Driftlänge.

wurde mit verschiedenen Methoden durchgeführt. Ein wesentlicher Bestandteil dabei ist die Optimierung der Größe der Auslesepads, die hinter der GEM Folie die Ladung aufsammeln und an die Ausleseelektronik weiterleiten. Die gezeigten Daten wurden mit 2 mm breiten Pads aufgezeichnet. Diese Pads sind bei 4 T Feldern zu groß, wie man zum Beispiel an der Tatsache sehen kann, dass die Auflösung bei sehr kleinen Abständen ansteigt statt weiter abzufallen. Dies ist dadurch bedingt, dass die Ladungswolke kleiner wird als die Pad Größe und damit keine präzise Ortsinformation mehr zur Verfügung steht. Messungen mit einer kleineren Auslesestruktur sind in Vorbereitung und werden im Laufe des Jahres 2007 durchgeführt.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Doppelspurauflösung. Gerade bei den sehr hochenergetischen und jet-artigen Ereignissen am ILC ist es sehr wichtig, auch sehr dicht beieinanderliegende Spuren voneinander zu trennen. Eine systematische Studie der Doppelspurauflösung wurde mit Hilfe eines Laserstrahles durchgeführt. Hierzu wird ein UV-Laserstrahl auf einen Querschnitt von unter 100 μm fokussiert und in die Kammer eingeführt. Mit Hilfe eines Quarzprismas wird der Strahl in zwei Strahlen aufgespalten, die einen Winkel von 0.5° zueinander haben und in das aktive Driftvolumen gelenkt werden. Aus der Rekonstruktion des Winkels und des Abstandes der beiden Spuren kann dann eine sehr genaue Messung der Doppelspurauflösung der Kammer abgeleitet werden.

Im Rahmen des EUDET Programmes haben im Laufe des Jahres 2006 die vorbereitenden Arbeiten zur nächsten Generation eines TPC Prototyps begonnen. Im Rahmen der internationalen LC-TPC Kollaboration wird ein TPC Prototyp entwickelt, der mit ca. 80 cm Durchmesser deutlich größer ist als bisherige Prototypen. Mit dieser Kammer, die auf den auch im Rahmen des EUDET Programmes am DESY aufgebauten Magneten PCMag abgestimmt ist, sollen Fragen der großflächigen Installation einer GEM Auslese, der Kalibration und der Teilchenidentifikation angesprochen werden. DESY hat die Verantwortung für den Design und den Bau des Feldkäfigs übernommen. In enger Zusammenarbeit mit der Industrie wurde ein Design für den Feldkäfig entwickelt, welcher im Laufe des Jah-

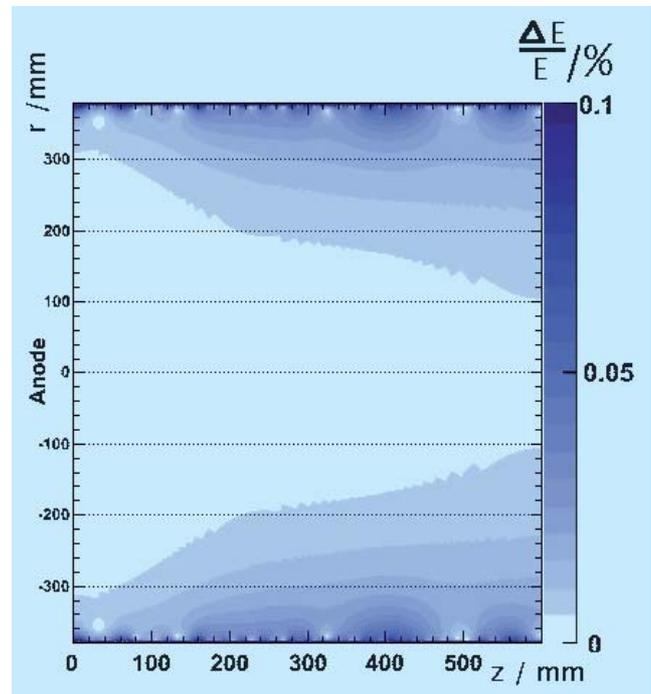


Abbildung 76: Simulierte Driftfeld Verzerrungen in der TPC, mit der Annahme eines realistischen Feldkäfigs.

res 2007 industriell gefertigt werden wird. Im Rahmen des Designs sind am DESY detaillierte Simulationen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Feldkäfigs durchgeführt worden. In Abbildung 76 ist die Simulation des elektrischen Feldes in der Kammer für eine optimierte Feldkäfigstruktur gezeigt. Abweichungen vom idealen Feld sind kleiner als 10^{-3} .

Im Jahre 2007 werden im Rahmen der TPC Gruppe die Arbeiten mit dem kleinen Prototypen weitgehend zu einem Abschluss gebracht werden. Es ist geplant, die Ergebnisse der Einzelpunktauflösung und der Doppelspurauflösung zu publizieren. Im Laufe des Sommers 2007 wird der Feldkäfig am DESY eintreffen, ausgerüstet und in Betrieb genommen werden. Zusammen mit internationalen Partnern werden erste Messungen mit der neuen Kammer im Jahre 2008 erwartet, so dass Ergebnisse im Jahre 2009 vorliegen können. Diese Ergebnisse werden bei der Erstellung eines *Engineering Design Reports* für einen Detektor im Jahre 2010 eine wichtige Rolle spielen.

Kalorimeter

Das Kalorimeter spielt eine zentrale Rolle beim Detektor für den ILC. Am DESY werden intensive Entwicklungsarbeiten an einem hadronischen Kalorimeter durchgeführt. Diese Arbeiten sind in der internationalen CALICE Kollaboration eingebettet, einer Gruppe von mehr als 150 Physikern aus 13 Ländern. Das Hauptziel der Arbeiten ist die Entwicklung einer neuen Generation von Kalorimetern, die mit bisher unerreichter Granularität und Segmentation alle bisher gebauten Kalorimeter in den Schatten stellen sollen.

Das hadronische Kalorimeter basiert auf einem konventionellen Aufbau von Stahlabsorberplatten und Szintillatorplatten zur Auslese. Neu ist die Auslese der Szintillatorplatten, die aufgrund der Entwicklung kleiner, leistungsstarker Silizium basierender Photodetektoren direkt in die Szintillatorplatten integriert werden kann. Am DESY ist in den Jahren 2005 und 2006 ein großer Prototyp eines solchen hochgranularen Kalorimeters gebaut worden.

In vier Monaten zwischen Juni und Oktober 2006 wurde dieser Prototyp zusammen mit einem Prototypen eines elektromagnetischen Kalorimeters und einem Muon-Detektor in einem hadronischen Teststrahl am CERN ausführlich vermessen (siehe Abbildung 77).

Das Teststrahl Experiment hat zwei Hauptziele: die Detektor Technologie soll in einer großen Anwendung unter realistischen Bedingungen etabliert werden, und Daten über die Entwicklung hadronischer Schauer sollen mit diesem sehr granularen Kalorimeter aufgezeichnet und analysiert werden. Die Daten sollen dann verwendet werden, um einerseits die Modelle hadronischer Schauer zu überprüfen, andererseits, um *Particle Flow* Algorithmen basierend auf richtigen Daten entwickeln zu können. Fernziel der Aktivitäten ist es, ausreichend Daten und ausreichend Erfahrungen zu sammeln, um eine fundierte Optimierung eines Kalorimeters für den ILC durchführen zu können.

Während der Datennahme hat der CALICE Detektor mit mehr als 90%iger Effizienz Daten aufgezeichnet. Insgesamt hat die Kollaboration mehr als 65 Millionen Ereignisse aufgezeichnet (siehe Abbildung 78). Hadro-

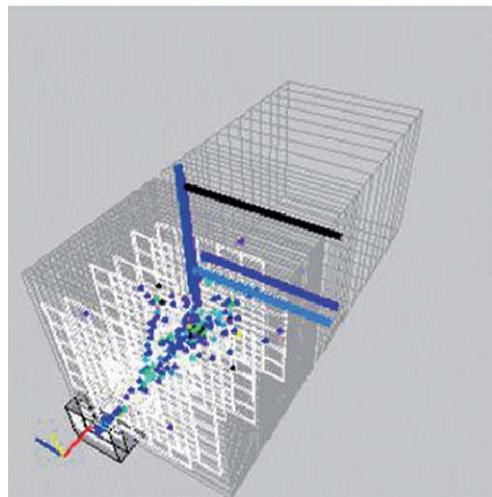
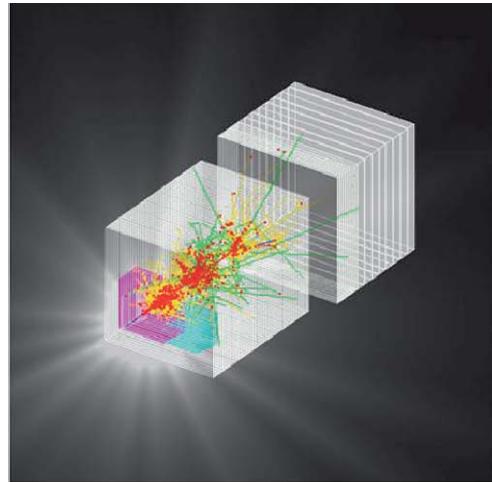


Abbildung 77: Oben: Simulierter Pionen Schauer im CALICE Experiment mit ECAL, HCAL und TCMT aktiv; Mitte: Photo des Teststrahl experimentes am CERN; Unten: Pion Ereignis im on-line Event Display.

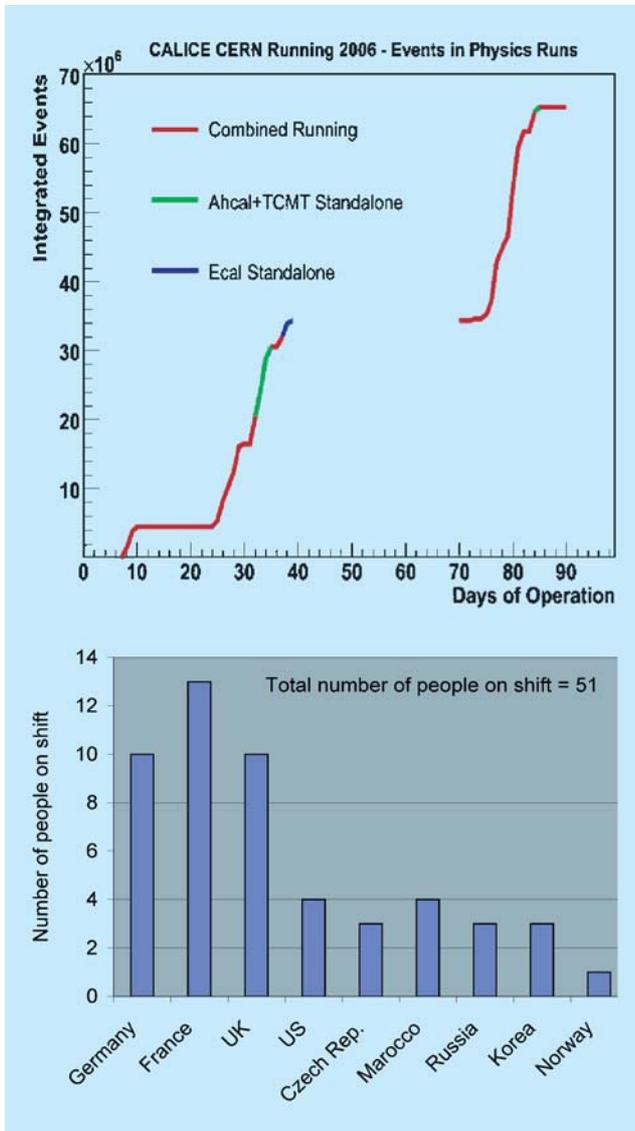


Abbildung 78: Oben: Entwicklung der Zahl der aufgezeichneten Ereignisse im Test Strahl Experiment, als Funktion der Zeit in der Periode Juli–November 2006. Unten: Plan der geleisteten Schichten der Mitglieder der CALICE Kollaboration während der verschiedenen Test Strahl Perioden.

nen und Muonen wurden mit verschiedenen Impulsen aufgezeichnet. Sowohl positiv als auch negativ geladene Teilchen bei Energien zwischen 6 und 45 GeV wurden untersucht. Aus technischen und Zeit Gründen konnten Daten nur unter Null Grad Einfallrichtung

aufgezeichnet werden. In einem zweiten Teststrahl Experiment im Jahre 2007 sollen Daten auch unter anderen Winkeln genommen werden.

Seit der Beendigung der Datennahme konzentriert sich die Kollaboration auf die Analyse der Daten. Ein wesentlicher Schritt war dabei die Kalibration der etwa 10000 Kalorimeter Zellen, die mit Hilfe elektromagnetischer Schauer im ECAL und im HCAL bewerkstelligt wurde. Eine detaillierte Analyse der hadronischen Schauer hat gerade begonnen.

Im Jahre 2007 wird das experimentelle Programm mit einem weiteren Experiment am CERN fortgesetzt. Der Detektor wird dann vollständig instrumentiert sein und auch in unterschiedlichen Positionen relativ zum Strahl positionierbar sein.

FCAL – Vorwärtskalorimeter

In der strahl nahen Region des geplanten ILC Detektors sind zwei Kalorimeter vorgesehen. Das BeamCal, welches direkt an der Strahlröhre anliegt und Polarwinkel von etwa 5 bis 30 mrad überdeckt, muss unter sehr hoher Strahlenbelastung funktionstüchtig bleiben. Elektronen und Positronen, die durch Beamstrahlung erzeugt werden, deponieren eine Dosis von etwa 10 MGy pro Jahr. Für die Physik am ILC ist es wichtig, hochenergetische einzelne Elektronen bis zu kleinsten Polarwinkeln zu erkennen, da diese einen Untergrund bei der Suche nach neuen Teilchen verursachen. Zu diesem Zweck muss das Kalorimeter kompakt sein und über feinstrukturierte Sensoren verfügen. Die Verteilung der Beamstrahlungspaare im Bereich des BeamCal soll zur Strahldiagnose und -korrektur genutzt werden. Das LumiCal, bei größeren Polarwinkeln, ist das Instrument zur präzisen Luminositätsmessung. Die angestrebte Genauigkeit von etwa 10^{-4} erfordert extrem genau gebaute Kalorimeter, deren Position ebenfalls sehr genau kontrolliert werden muss.

FCAL ist eine weltweite Kollaboration von 13 Instituten, welche sich das Ziel gesetzt hat, die Technologie für diese Kalorimeter zu entwickeln. Die europäischen

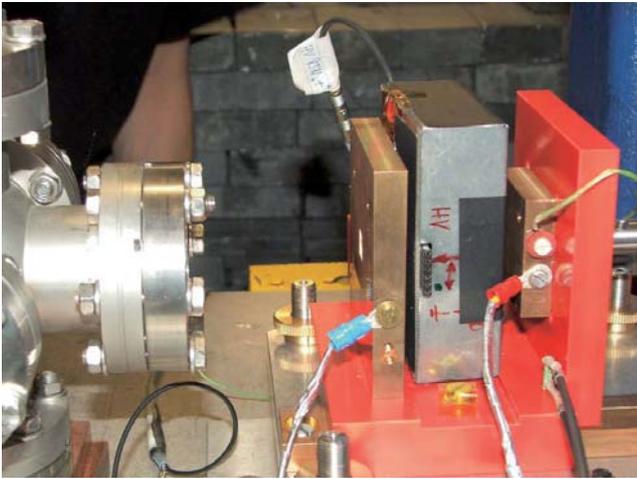


Abbildung 79: Messstand am S-DALINAC. Links befindet sich das Austrittsfenster des Elektronenstrahls. Nach rechts folgt ein Kollimator, die Box mit dem Sensor (Aufschrift HV) und der Strahlfänger. Mit letzterem wird der Elektronenstrom durch den Sensor gemessen.

Institute werden dabei vom Infrastrukturprogramm EU-DET der Europäischen Union unterstützt. Im Rahmen dieses Programms wurde im letzten Jahr die Ausrüstung für den Test der Strahlenhärte von Sensoren für das BeamCal entwickelt, aufgebaut und für Sensortests verwendet. In Abbildung 79 ist als Beispiel der Testaufbau am S-DALINAC Beschleuniger der TU Darmstadt gezeigt. Vermessen wurden Silizium- und Diamantsensoren, letztere bis zu einer Dosis von 7 MGy. Die Daten werden zurzeit analysiert.

Sensorstudien mit poly- und einkristallinen CVD Diamanten wurden im Rahmen von NoRHDia, eines ebenfalls von der Europäischen Union unterstützten Technologieprogramms, weiter vorangetrieben. Die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut FAP ermöglichte auch die Untersuchung von speziell für BeamCal entwickelten Prototypen. Mit Partnern im JINR in Dubna wurden Prototypen von Gallium-Arsenid Sensoren in Auftrag gegeben. Die ersten Exemplare, wie in Abbildung 80 gezeigt, wurden 2006 geliefert und werden im Moment getestet.

Im Rahmen von EUROTeV wurde weiter an einem Konzept zur schnellen Luminositätsmessung gearbeitet. Letztere erlaubt innerhalb eines Zuges von Elektron-

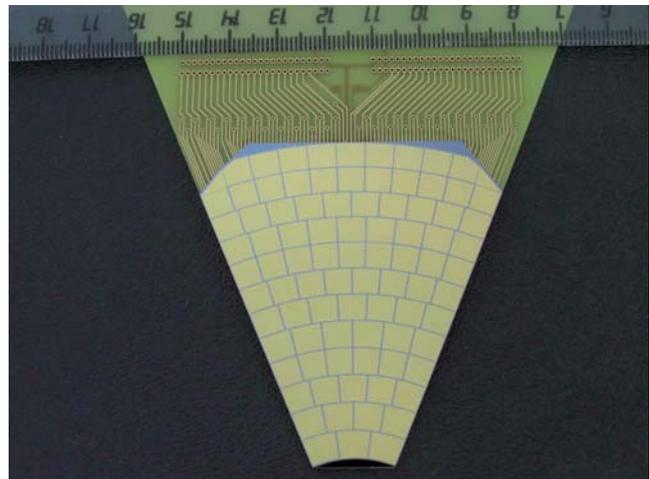


Abbildung 80: Ein Sensor aus Gallium-Arsenid für die mögliche Anwendung im BeamCal.

und Positronpaketen den Strahl so zu steuern, dass am Kollisionspunkt die maximale Luminosität erreicht wird.

Softwarearbeiten zum ILC

Software spielt bei der Entwicklung eines ILC Experimentierprogrammes eine wichtige Rolle. DESY hat wesentliche Arbeiten zur Entwicklung einer Software Umgebung am ILC beigetragen. Besonders erwähnt werden sollte hier die Entwicklung des LCIO Datenmodells und Speichersystemes, das inzwischen von fast der gesamten ILC Community akzeptiert worden ist. Dieses zentral unterstützte Datenmodell erleichtert den Austausch von Daten, und definiert die verschiedenen Bausteine, aus denen ein ILC Ereignis zusammengesetzt wird.

Im Berichtszeitraum sind die Entwicklungsarbeiten am LCIO Modell fortgeführt worden, haben sich aber vor allem auf Wartung beschränkt.

Wesentliche neue Entwicklungen hat es im Bereich der Analyse gegeben. Mit dem ebenfalls am DESY entwickelten MARLIN Program gibt es jetzt eine Software Umgebung, die, basierend auf LCIO, eine relativ einfache und modulare Struktur bereitstellt, in der Nutzer Rekonstruktionen und Analysesoftware entwickeln

können. MARLIN besteht aus einer relativ einfachen Core-Software, und vielen Anwenderpaketen, die verschiedene Funktionalitäten bereitstellen.

Der Schwerpunkt der Entwicklungen im Berichtszeitraum lag auf der Entwicklung eines Algorithmus zum Teilchenfluss (*Particle Flow*, PFA). PFA ist ein Ansatz, der eine deutlich bessere Rekonstruktion der ILC Ereignisse verspricht. Er beruht auf der zentralen Annahme, dass es möglich ist, einzelne Teilchen, geladene wie neutrale, im ILC Detektor zu rekonstruieren. Neben einer sehr leistungsfähigen Rekonstruktion geladener Teilchen, die vor allem im Spurdetektor stattfindet, beruht dies entscheidend auf der Rekonstruktion neutraler Teilchen im Kalorimeter.

Sorgfältige Studien haben begonnen, in denen die Möglichkeit einer solchen umfassenden Rekonstruktion im Kalorimeter untersucht wird. Die Granularität im Kalorimeter spielt hier eine wesentliche Rolle, zusammen mit der Entwicklung geeigneter Mustererkennungsalgorithmen, die im Kalorimeter effizient funktionieren.

DESY spielt auch weiterhin eine zentrale Rolle bei der Verwaltung der ILC Software. In diesem Jahr wurde in Zeuthen die Adaption des LCIO Projektes auf 64-bit Architekturen vollzogen. Desweiteren wurden weitere ILC-Softwareprojekte auf dem CVS Server installiert. Insgesamt sind es jetzt 13 Projekte (bbrtrack, brahms, calice, eutelescope, gear, ilcdcr, ilctools, lccd, marlin, marlinreco, marlintpc, merlin und simdet), die ihre Software-Entwicklung auf dem Server vornehmen.

EUDET

Anfang 2006 startete das EUDET-Projekt (www.eudet.org), das von der Europäischen Kommission gefördert wird und Entwicklungsarbeiten für Detektoren am ILC unterstützt. EUDET ist eine Initiative im 6. EU Forschungsrahmenprogramm, die insbesondere auf die Verbesserung von Infrastrukturen zur Detektorentwicklung abzielt. Für die ILC Detektorentwicklung werden mit Hilfe von EUDET Infrastrukturen aufgebaut und

verbessert, welche die in den nächsten Jahren notwendigen Experimente mit größeren Detektor-Prototypen erlauben. Alle Aktivitäten sind eingebettet in die geplanten Arbeiten der internationalen ILC Detektor R&D Kollaborationen.

Insgesamt sind 31 europäische Universitäten und Forschungsinstitute an EUDET beteiligt, mit DESY als koordinierendem Partner. Weiterhin gibt es über 20 Institute aus Europa und anderen Kontinenten, die als assoziierte Partner an dem Projekt beteiligt sind. Das Projekt ist auf 4 Jahre bis Ende 2009 angelegt und hat einen Gesamtumfang von über 21 Millionen Euro, von denen 7 Millionen von der EU beigetragen werden. Die EUDET-Kollaboration veranstaltete ein Kick-off Meeting im Februar am DESY und das erste Jahrestreffen im Oktober am MPI München mit jeweils mehr als 100 Teilnehmern. Alle im ersten Jahr gesteckten Ziele wurden erreicht.

Im Rahmen von EUDET ist es auch möglich europäische Gruppen zu fördern, die am DESY Teststrahl Experimente durchführen wollen, sowohl für ILC als auch andere Detektorprojekte. Nach Begutachtung eines Antrages können aus EU-Mitteln Reisen und Aufenthalt von Forschergruppen aus dem europäischen Ausland übernommen werden.

Die DESY bezogenen EUDET Aktivitäten sind bereits an anderer Stelle in diesem Bericht erwähnt worden.

Öffentlichkeitsarbeit bei FLC

Kommunikation und Outreach sind schon seit langem fester Bestandteil der Aufgaben der Gruppe FLC. Seit März werden diese Aufgaben von einer der vier ILC-Kommunikatoren übernommen, die für Pressearbeit und Kommunikation des ILC verantwortlich sind. Zu den Aufgaben gehört die wöchentliche Publikation von ILC NewsLine (einschließlich der Recherche, des Schreibens und Redigierens von Berichten), Bestimmung des Inhalts und Aktualisierung der Webseite www.linearcollider.org, Erstellung von Sonderpublikationen wie dem ILC-Flyer oder das RDR

Companion Document. Im Jahr 2006 haben die ILC-Kommunikatoren einen strategischen Kommunikationsplan ausgearbeitet und in weiten Teilen umgesetzt. Zurzeit findet ein Übergang statt, in dem die Gewichtung von interner Kommunikation auf externe Kommunikation verlagert wird.

Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit der DESY PR-Abteilung. So wurde zum Beispiel eine Vortragsveranstaltung und Ausstellung im Rahmen des *Euro-science Open Forum* (ESOF) in München organisiert, die regen Zuspruch fanden. Mehr als 20 Journalisten nahmen an der Journalistenreise zum CERN zu dem Thema *Die deutschen Beiträge zum LHC* teil, organisiert von DESY PR/FLC und dem Max-Planck-Institut für Physik in München. Die vielen Artikel in regionalen und nationalen Zeitungen zeugen vom großen Interesse an technischen Themen auch in nicht technisch spezialisierten Medien. Auch bei der neuen DESY-Mitarbeiterzeitung *inForm* ist FLC fest eingebunden.

Zusammenfassung und Ausblick

Das ILC Projekt am DESY hat im Jahre 2006 wesentliche Fortschritte machen können. Die termingerechte Fertigstellung des *Reference Design Reports* für die Maschine und für das Experimentierprogramm am ILC ist durch wesentliche Beiträge von DESY Gruppen mit ermöglicht worden. Im Rahmen der ILC Projektgruppe werden Arbeiten in Hamburg und Zeuthen, und in verschiedenen Bereichen am DESY koordiniert. Regelmäßige Treffen der verschiedenen Fachgruppen miteinander stellen ein effizientes Arbeiten sicher.

Die Arbeiten am ILC profitieren wesentlich von der großen Nähe zum XFEL Projekt. Viele Synergie Effekte können hier ausgenutzt werden, und führen zu einer zentralen Rolle des DESY in verschiedenen Systemen des ILC. Besonders wichtig war im Berichtszeitraum die Inbetriebnahme des neuen Modul 6.

Detektorentwicklung in Hamburg konzentriert sich auf die Entwicklung der MAPS Technologie für einen Vertex Detektor, die Entwicklung einer TPC und eines hadronischen Kalorimeters für den ILC. Die Arbeiten werden wesentlich im Rahmen der Gruppe FLC und den ZEUS und H1 experimentellen Gruppen durchgeführt. In Zeuthen finden Arbeiten zur Entwicklung des FCAL statt. Physikstudien und Softwareentwicklungen werden in enger Kooperation zwischen beiden Standorten durchgeführt.

Im Jahre 2006 nahm die Emmy Noether Nachwuchsgruppe unter der Leitung von Frau Dr. Jenny List ihre Arbeit auf. Die Arbeiten zur Polarisationsmessung am ILC und die Untersuchungen zum Potential des ILC bei der Suche nach Dunkler Materie werden von dieser Gruppe durchgeführt. Die HGF Nachwuchsgruppe unter der Leitung von Frau Dr. Erika Garutti engagiert sich in der Entwicklung des hadronischen Kalorimeters und untersucht gleichzeitig Anwendungen der für das HCAL entwickelten Technologien z. B. in der Medizintechnologie.

Die nächsten Jahre werden wesentlich von einem Übergang von reinen R&D Studien zu Ingenieursstudien bestimmt sein. Die R&D Arbeiten werden bis zum Ende des Jahrzehntes ein vorläufiges Ergebnis erreicht haben. Parallel dazu werden die Vorbereitungen für einen *Engineering Design Report* der Maschine und des Detektors anlaufen.

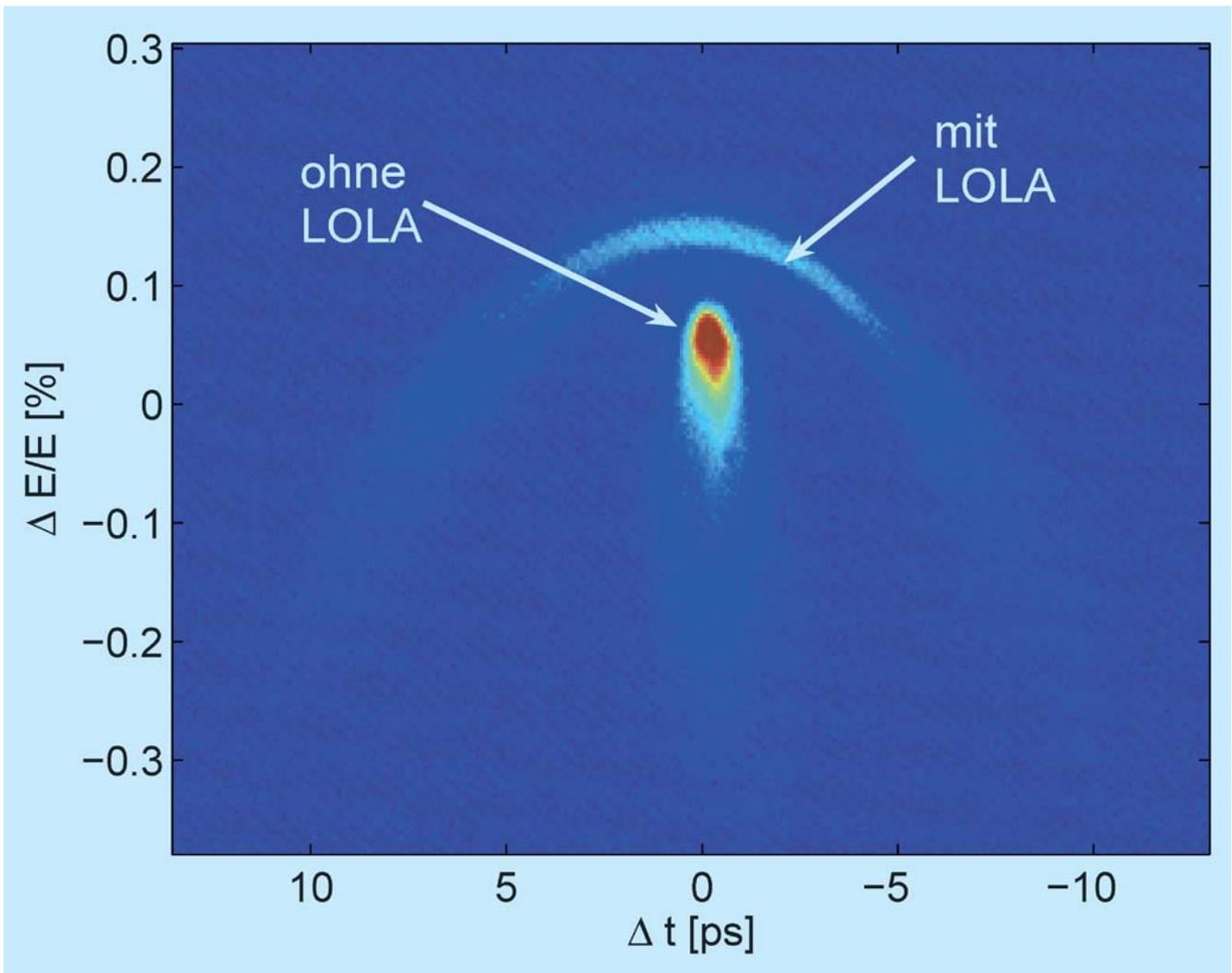


Abbildung 81: Bild der Verteilung der Elektronen im longitudinalen Phasenraum für unkomprimierte Elektronenpakete (on-crest-Betrieb der supraleitenden Resonatoren). Mit ausgeschalteter HF an der Struktur LOLA ergibt sich ein ausgedehnter Strahlfleck. Wenn LOLA horizontal ablenkt, wird die Energieverteilung innerhalb des Bunches sichtbar. Man erkennt sehr schön den Cosinusförmigen Verlauf des Beschleunigungsfeldes in den Resonatoren.

Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe FLA arbeitet an hochauflösenden Strahldiagnosesystemen für FLASH und den XFEL. Zur Bestimmung der longitudinalen Ladungsverteilung in den komprimierten Elektronenpaketen werden drei Methoden angewandt: die elektro-optische (EO) Abtastung, die THz-Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung und die transversale Strahlablenkung mittels einer Hochfrequenz-Wanderwellenstruktur (genannt LOLA). Ein wichtiges Projekt der Gruppe ist ein optisches Synchronisationssystem für supraleitende Linacs mit Femtosekunden-Genauigkeit, das für den International Linear Collider ILC und den Röntgenlaser XFEL von zentraler Bedeutung sein wird und in absehbarer Zeit am FLASH-Linac installiert und erprobt werden soll.

Elektro-optische Vermessung der Elektronen-Pakete in Linearbeschleunigern

Die im Jahr 2005 begonnenen elektro-optischen (EO) Messungen an einzelnen Elektronenpaketen (*single-shot*) sind 2006 fortgeführt und erheblich verbessert worden. Mit der Methode der spektralen Codierung (siehe Jahresbericht 2005) sind Messungen an einem 175 μm dicken Gallium-Phosphid-Kristall durchgeführt worden. Parallel dazu wurde die Bunchform mit der transversal ablenkenden Wanderwellenstruktur LOLA mit sehr guter Auflösung vermessen (siehe weiter unten). Der mit LOLA ermittelte zeitliche Verlauf des Pulses wurde als Eingangsgröße einer Simulation des

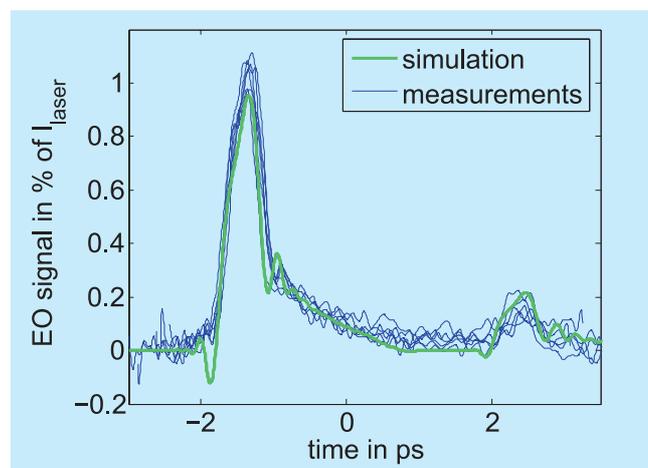


Abbildung 82: Die Pulsformen einzelner Elektronenpakete, gemessen mit der spektralen Codierungsmethode an einem 175 μm dicken Gallium-Phosphid-Kristall. Die dickere durchgezogene Kurve zeigt die Vorhersage aufgrund der in der Struktur LOLA ermittelten Pulsform. Das kleine zweite Maximum in einem Abstand von 4 ps vom Hauptmaximum ergibt sich durch Zweifachreflektion des THz-Pulses im GaP-Kristall.

elektro-optischen Effekts in GaP verwendet unter Anwendung der im TESLA Report 2005-01 beschriebenen Methoden. In Abbildung 82 wird die vorhergesagte Form des EO-Signals mit den gemessenen EO-Signalen von 10 Elektronenbunchen verglichen. Die Übereinstimmung ist perfekt. Dies ist unseres Wissens die erste absolute Pulsformbestimmung von THz-Pulsen mit Hilfe des elektro-optischen Effekts.

In Zusammenarbeit mit Physikern des Infrarot-FEL-Labors FELIX in Nieuwegein (Niederlande), der Universitäten von Dundee und Aberty Dundee (Schott-

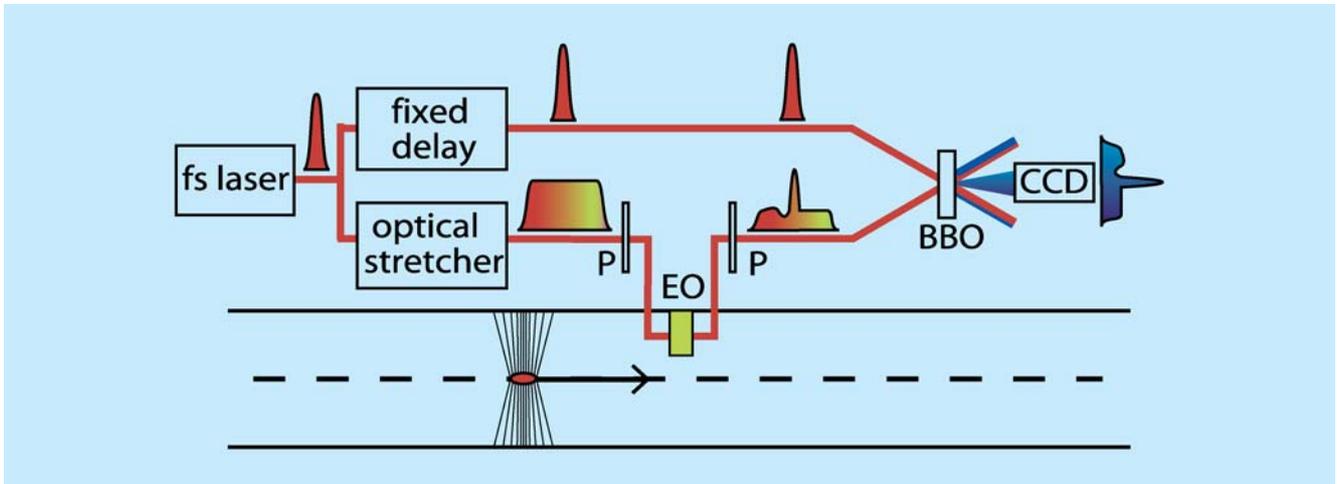


Abbildung 83: Schematische Darstellung der elektro-optischen Rekonstruktion der Ladungsverteilung in einzelnen Elektronenpaketen mit Hilfe der zeitlichen Codierung (electro-optic temporal decoding EOTD). Der verstärkte Laserpuls mit einer Energie von 1 mJ und einer Dauer von 30 fs wird in einen 30 fs langen Testpuls und einen auf 20 ps gestreckten Abtastpuls aufgespalten. Der Abtastpuls durchläuft einen Polarisator P und danach den im Strahlrohr befindlichen EO-Kristall, wo dem Laserpuls eine elliptische Polarisation aufgeprägt wird, die proportional zur elektrischen Feldstärke des Bunches ist und den gleichen zeitlichen Verlauf hat. Diese elliptische Polarisation wird im zweiten Polarisator in eine Intensitätsmodulation umgewandelt. Abtast- und Teststrahl werden im BBO-Kristall unter einem Kreuzungswinkel von 38° überlagert. Die UV-Strahlung aus der Überlagerung der beiden Strahlen verläuft in Richtung der Normalen des BBO-Kristalls. Sie ist dadurch räumlich von dem UV-Licht getrennt, welches von den Einzelstrahlen erzeugt wird.

land) und des Daresbury Laboratory (UK) ist ein EO-Experiment mit zeitlicher Codierung aufgebaut worden, das Einzelbunch-Messungen mit hervorragender Zeitaufösung erlaubt. Das Schema wird in Abbildung 83 gezeigt. Ein verstärkter Titan-Saphir-Laserpuls von 30 fs Länge wird in einen *Testpuls* (obere Spur) und einen *Abtastpuls* (untere Spur) aufgespalten. Der Abtastpuls wird mit einer Gitteranordnung auf 20 Picosekunden gestreckt. Im Gallium-Phosphid-Kristall wird die elektrische Feldverteilung des Bunches dem Abtastpuls aufgeprägt, der dabei eine zeitabhängige elliptische Polarisation erhält. In einem frequenzverdoppelnden BBO-Kristall werden Abtast- und Testpuls unter einem Kreuzungswinkel von 38° überlagert. Die Zeitinformation des Abtastpulses setzt sich dabei in eine räumliche Verteilung der entstehenden UV-Strahlung um. Die UV-Strahlung wird mit einer

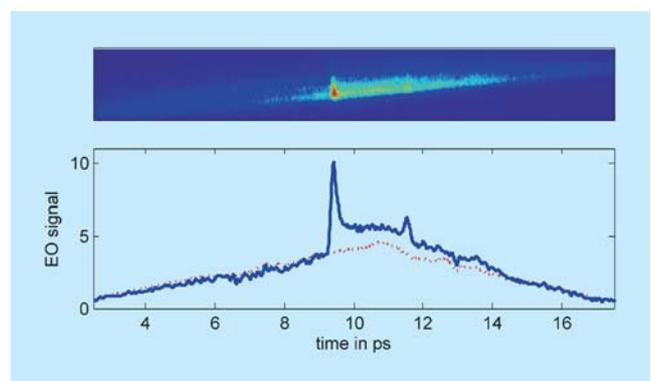


Abbildung 84: Oben: Zweidimensionales CCD-Bild der Lichtverteilung im BBO-Kristall. Die Zeitachse verläuft horizontal. Unten: zeitlicher Verlauf des EO-Signals. Der Kopf des Elektronenpakets befindet sich auf der linken Seite. Gestrichelt ist der Untergrund, der bei Abwesenheit des Elektronenpakets beobachtet wird.

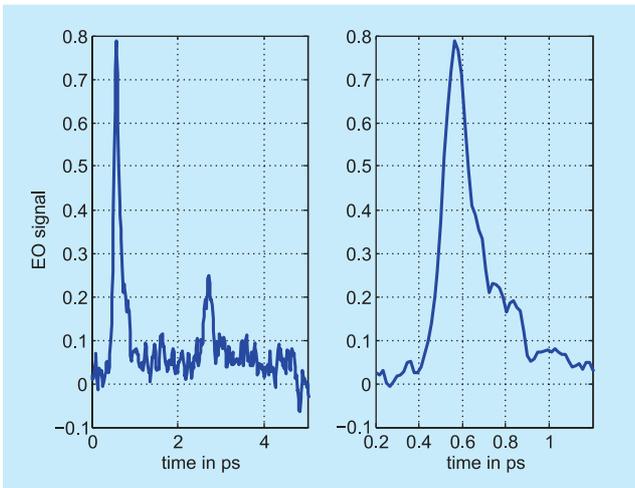


Abbildung 85: Links: Pulsform eines einzelnen Elektronenpakets, gemessen mit der zeitlichen Codierungsmethode. Der Kopf des Bunches liegt bei 0.6 ps. Die Dicke des GaP-Kristalls beträgt 65 μm . Rechts: Form des Kopfes auf einer gestreckten Zeitskala.

bildverstärkenden CCD-Camera abgebildet, siehe Abbildung 84.

Die typische Pulsform eines einzelnen Bunches wird in Abbildung 85 gezeigt. Die Zeitauflösung beträgt 50 fs (rms) und ist um einen Faktor 2 besser als bei der spektralen Codierung.

Hochpräzise Ankunftszeitmessung der Elektronenpakete

Für zeitkritische Experimente bei FLASH besteht großes Interesse an einem Messgerät, das die Ankunftszeit der Elektronenpakete am Undulator mit hoher Genauigkeit bestimmen kann. Zu diesem Zweck ist ein Monitor entwickelt worden, der direkt die 1550 nm Laserpulse des optischen Synchronisationssystems verwendet. Das Schema und die Funktionsweise werden in Abbildung 86 gezeigt. Die hochfrequenten Signale einer breitbandigen Strahlantenne (*beam pickup*) werden zu einem elektro-optischen Modulator (EOM) geleitet. Die Pulsform der Signale entspricht im Wesentlichen

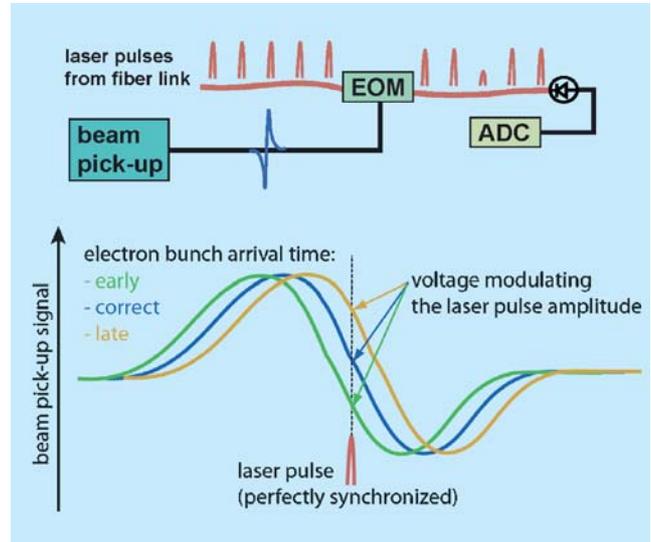


Abbildung 86: Oben: Funktionsprinzip des Ankunftszeitmonitors. Der dritte Laserpuls ist koinzident mit einem Bunch. Unten: Relative zeitliche Lage zwischen Laserpuls und HF-Signal des Bunches. Die mittlere Kurve zeigt perfekte zeitliche Koinzidenz.

der zeitlichen Ableitung des elektrischen Feldes $E(t)$ des Bunches. Im EOM wird ein mit dem Bunch koinzidenter Laserpuls durch das HF-Signal amplitudenmoduliert. Um möglichst gute Zeitauflösung zu erhalten, wird in der Nähe des steilen Nulldurchgangs des HF-Transienten gemessen. Ändert sich die Ankunftszeit des Bunches, so kommt das HF-Signal zeitlich früher oder später, und entsprechend erhöht oder erniedrigt sich die Modulationsspannung des abtastenden Laserpulses. Die Amplitude des modulierten Laserpulses ist somit ein empfindliches Maß für die Ankunftszeit des Elektronenpakets.

Über einen längeren Bunchzug beobachtet man eine systematische Variation der Ankunftszeit, siehe Abbildung 87. Dies deutet auf eine systematische Energievariation innerhalb des Bunchzuges hin, die sich in den magnetischen Umwegen der Bunch-Kompressoren in eine Zeitverschiebung übersetzt. Daraus erkennt man, dass der Ankunftszeitmonitor auch ein wichtiges Diagnoseinstrument für FLASH darstellt. Neben der systematischen Verschiebung gibt es noch zeitliche Schwankungen, die aber innerhalb eines Bunchzuges

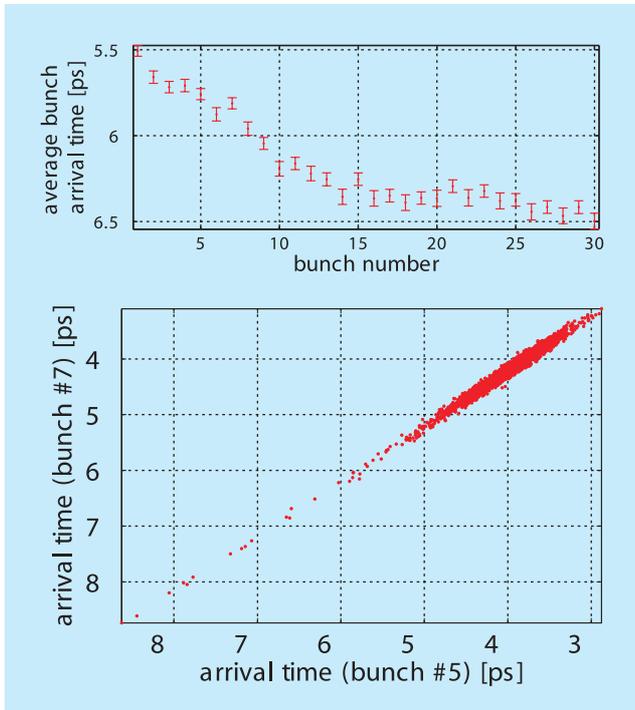


Abbildung 87: *Oben: Systematische Variation der Ankunftszeiten in einem Zug von 30 Bunchen. Unten: Korrelation zwischen den Ankunftszeiten von Bunch 5 und Bunch 7 in einem langen Bunchzug.*

weitgehend korreliert sind. Aus der Streuung der Daten ergibt sich eine Genauigkeit von 30 fs (rms) für die Bestimmung der Ankunftszeit.

Experimente mit kohärenter Übergangsstrahlung

Die Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung stellt ein wichtiges Instrument zur Untersuchung der longitudinalen Ladungsverteilung der Elektronenpakete dar. Der hierbei interessante Wellenlängenbereich ist durch die Größe der typischen Strukturen der Elektronenpakete (Bunche) gegeben; beim FLASH-Linearbeschleuniger liegen diese im Bereich von einigen Mikrometern bis zu mehreren hundert Mikrometern. Es handelt sich also um Strahlung im mittleren und fernen Infrarotbereich (0.2–50 THz). Die gemessene Intensitätsverteilung in der Fokalebene der THz-Strahlführung (siehe Jahresbericht 2005) wird in Abbildung 88 mit der berechneten Verteilung verglichen. Die Übereinstimmung ist sehr gut.

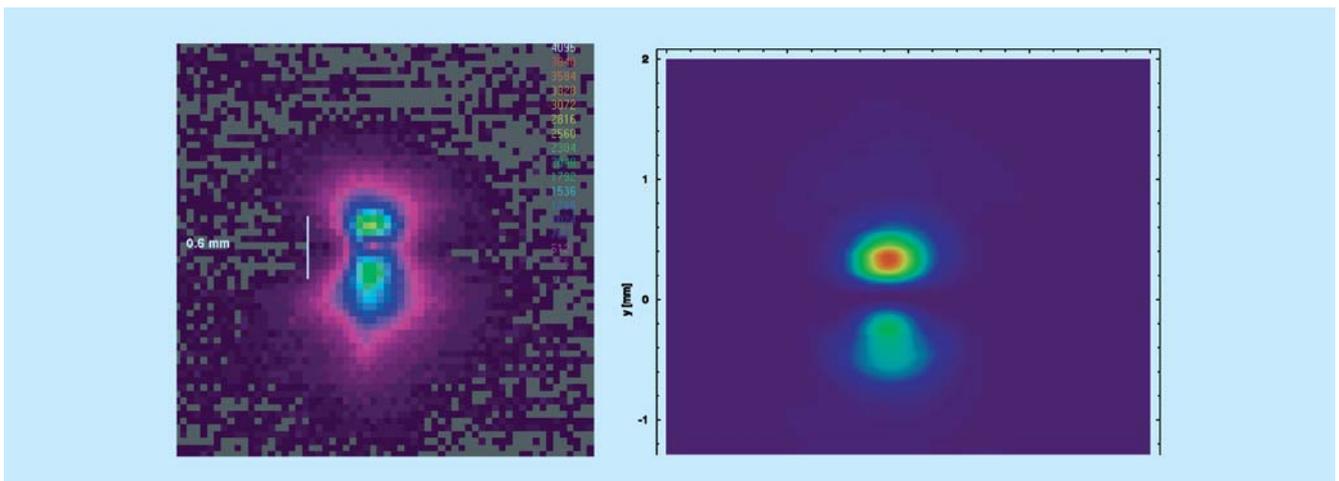


Abbildung 88: *Links: Gemessene zweidimensionale Intensitätsverteilung der kohärenten Übergangsstrahlung in der Fokalebene der THz-Strahlführung. Rechts: Berechnete Verteilung für eine Frequenz von 10 THz (dort liegt das Maximum der beobachteten Strahlung). Die Strahlung ist linear polarisiert in vertikaler Richtung.*



Abbildung 89: 30-Kanal pyroelektrischer Detektor. Die Sensoren sind halbkreisförmig angeordnet. Die Spektrometeranordnung befindet sich in einem evakuierten Behälter in der Fokalebene der im Jahresbericht 2005 beschriebenen THz-Strahlführung.

Da die Form der Elektronenbunche und damit das Strahlungsspektrum von Puls zu Puls stark variiert, ist es notwendig, das gesamte Spektrum aus einem einzelnen Strahlungspuls zu gewinnen. Bisher benutzte Methoden, die auf interferometrischen Messungen (Autokorrelationsfunktion) des Strahlungsspektrums beruhen, sind dazu nicht in der Lage. Für die THz-Strahlführung wurde daher ein neuartiges Gitterspektrometer mit großer Bandbreite entwickelt, das eine sequentielle Anordnung von Reflexions- und Transmissionsgittern zur spektralen Zerlegung der Strahlung benutzt. Zum Nachweis der Strahlung wurde ein pyroelektrischer Vielkanaldetektor (30 Kanäle) entwickelt, der es erlaubt, Einzelschusspektren mit hoher Sensitivität und für Wiederholraten von 1 MHz aufzuzeichnen. Ein Bild wird in Abbildung 89 gezeigt. Die pyroelektrischen Sensoren wurden nach unseren Spezifikationen von einer Firma (Infratec in Dresden) entwickelt. Sie sind mit speziellen Oberflächenbeschichtungen versehen, die die Reflektion der THz-Strahlung an der Vorder- und Rückseite des Detektorchips weitgehend unterdrücken. Auf diese Weise erreicht man ein nahezu frequenzunabhängiges Ansprechvermögen. Herkömmliche kommerzielle Pyro-Detektoren weisen dagegen periodische Einbrüche der Sensitivität als Funktion der Frequenz auf und sind für spektroskopische Anwendungen wenig geeignet.

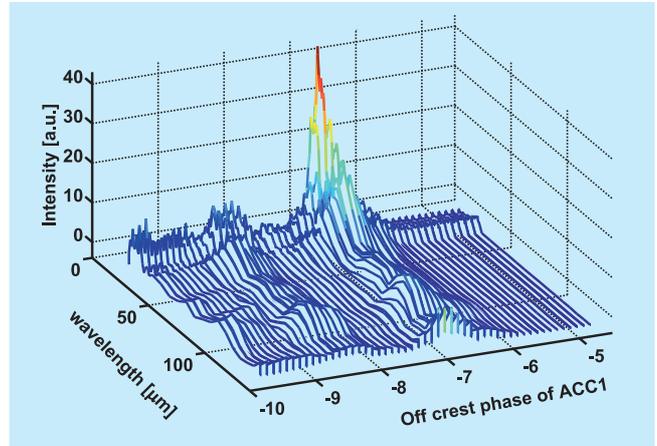


Abbildung 90: Spektrum der kohärenten Übergangsstrahlung als Funktion der HF-Phase in dem Beschleunigungsmodul ACC1.

Ein ganz entscheidender Parameter für die longitudinale Bunchkompression ist die Hochfrequenzphase im Beschleunigungsmodul ACC1, in welchem den Teilchen eine positionsabhängige Energie aufgeprägt wird. In Abbildung 90 sind die mit dem pyroelektrischen Vielkanaldetektor gemessenen Spektren für verschiedene Werte der HF-Phase aufgetragen. Bei der für den SASE-Betrieb optimalen Phase beobachtet man ein starkes Anwachsen der spektralen Intensität im Bereich von 20 – 50 μm . Dies zeigt sich auch in dem Spektrum in Abbildung 91, bei dem Messungen mit verschiede-

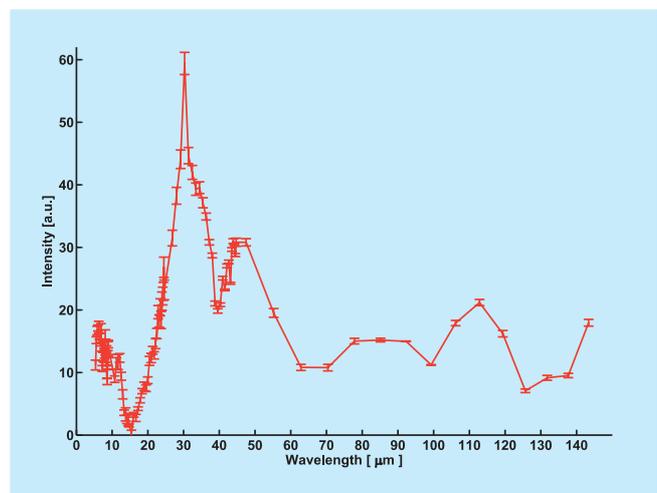


Abbildung 91: Kombiniertes Spektrum von verschiedenen Transmissions- und Reflektionsgittern.

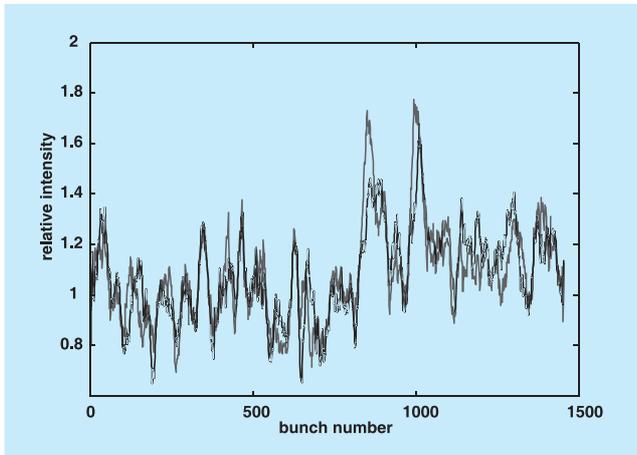


Abbildung 92: Die gemessene Pulsenergie des FEL-Lichts (schwarze Kurve) und die Intensität der kohärenten Übergangsstrahlung im Bereich 20–40 μm (graue Kurve) als Funktion der Bunchnummer.

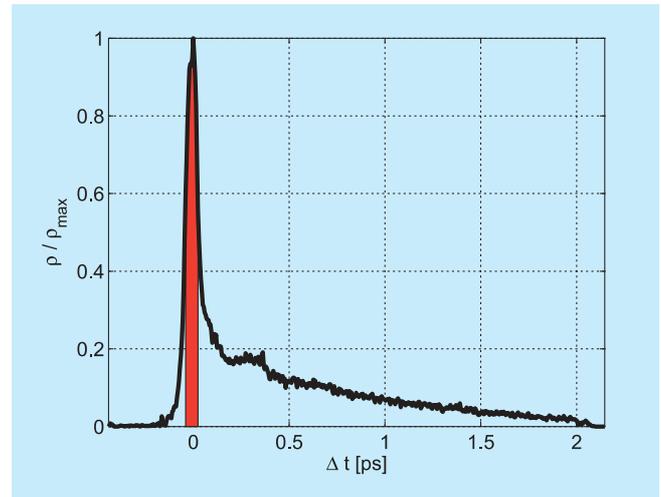


Abbildung 93: Das mit dem LOLA-Aufbau gemessene zeitliche Ladungsdichte-Profil eines Bunches.

nen Transmissions- und Reflektionsgittern kombiniert wurden.

Einzelschuss-Messungen der spektralen Intensität erlauben es, eine Korrelation mit der gemessenen FEL-Pulsenergie herzustellen, siehe Abbildung 92.

Messungen mit der transversal ablenkenden HF-Struktur

Ein äußerst leistungsfähiges Gerät zur Diagnose einzelner Elektronenpakete ist die HF-Wanderwellen-Struktur LOLA, die ähnlich wie ein Oszillograph funktioniert, aber eine tausendfach bessere Zeitauflösung hat. Anstelle der Sägezahnspannung dient eine Superposition von transversalen elektrischen und magnetischen Eigenschwingungen hoher Feldstärke zur transversalen Ablenkung der Elektronen. Auf diese Weise wird das Zeitprofil einzelner Bunches auf einem Leuchtschirm sichtbar und kann mit höchster Genauigkeit vermessen werden. Abbildung 93 zeigt die gemessene longitudinale Ladungsdichteverteilung im Bunch. Man beobachtet ein scharfes Maximum am Kopf des Bunches mit einer Halbwertsbreite von 70 fs sowie einen langen Ausläufer zu späteren Zeiten.

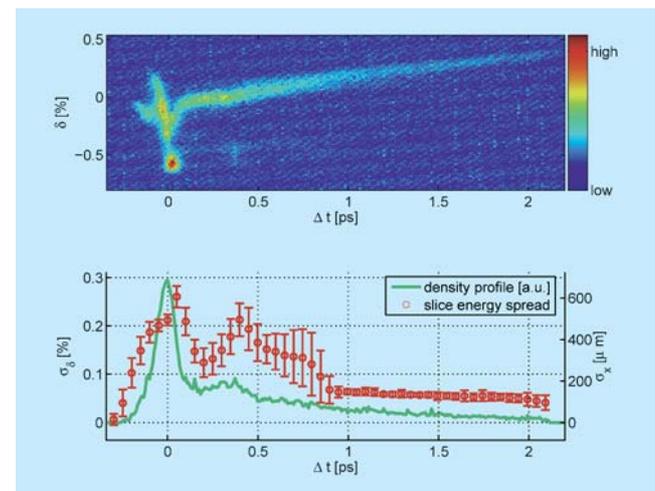


Abbildung 94: Oben: Bild der Verteilung der Elektronen im longitudinalen Phasenraum für optimale Kompression. Die Abszisse gibt die zeitliche Abweichung Δt der Teilchen vom Kopf des Bunches an, der sich bei $\Delta t = 0$ befindet. Die Ordinate zeigt die relative Abweichung $\delta = (E - E_0)/E_0$ von der Nominalenergie E_0 . Unten: Die Kurve zeigt die Ladungsdichte als Funktion von Δt , die Punkte mit Fehlerbalken geben die Energieverschmierung (energy spread) an.

In Abbildung 94 wird die Verteilung der Elektronen im longitudinalen Phasenraum gezeigt. Der Kopf des Bunches hat eine besonders komplizierte Energiestruktur,

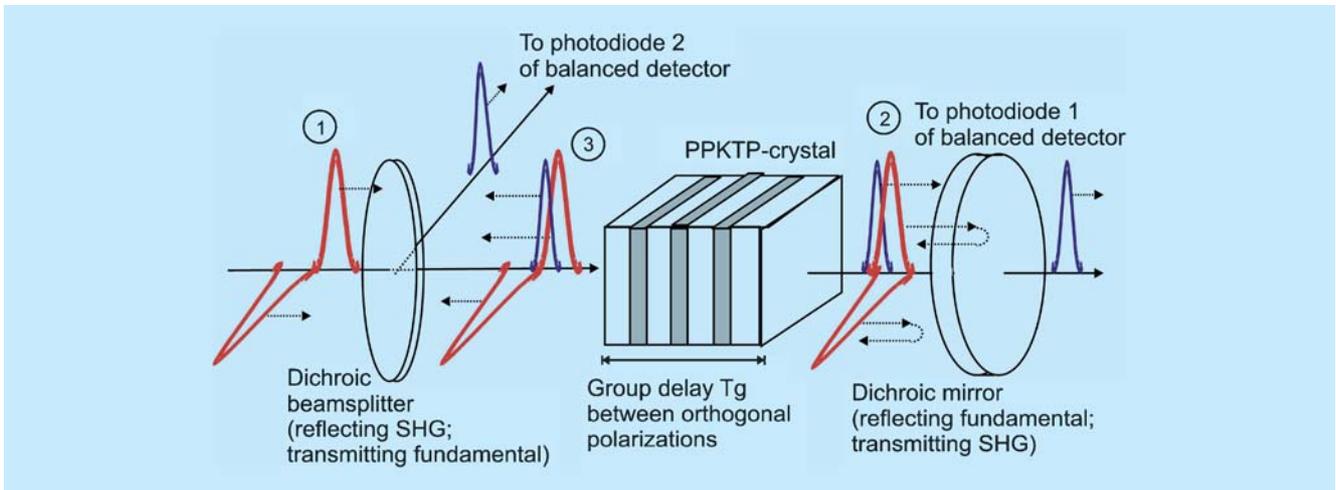


Abbildung 95: Schematischer Aufbau des balancierten Kreuz-Korrelators.

die durch Raumladungskräfte innerhalb des Bunches und kohärente Synchrotronstrahlung in den magnetischen Umwegen der Bunchkompressoren hervorgerufen wird.

Die Abbildung 81 demonstriert in eindrucksvoller Weise die vielseitigen Möglichkeiten des LOLA-Aufbaus, zum Verständnis der komplexen Vorgänge im FLASH-Linac beizutragen. Hier wurde die HF-Phase allen Beschleunigungsmodulen so gewählt, dass die Beschleunigung der Teilchen auf dem Maximum der HF-Welle erfolgte (sogenannter *on-crest*-Betrieb). Außerdem waren die Magnete der Bunchkompressoren ausgeschaltet.

Femtosekunden-Synchronisation

Im Jahresbericht 2005 ist dargelegt worden, dass konventionelle Hochfrequenz-Verteilungssysteme außerstande sind, die extremen Anforderungen an die Phasengenauigkeit der HF im ILC und im XFEL zu erfüllen. Als neues Konzept ist die Frequenzverteilung mit Hilfe von periodischen optischen Pulsen vorgestellt worden, basierend auf Faserlasern bei 1550 nm Wellenlänge. Die Pulse werden über längenstabilisierte Glasfaserleitungen im Beschleunigertunnel verteilt. Die benötigten Faserlaser sind gebaut und erprobt worden.

Entwicklung eines balancierten optischen Kreuz-Korrelators

Die optische Kreuz-Korrelation in einem frequenzverdoppelnden Kristall ist eine hochpräzise Methode, die Ankunftszeit von optischen Pulsketten aus verschiedenen Quellen relativ zu einander zu vermessen. In einem üblichen Kreuz-Korrelator hängt das Ausgangssignal nicht nur vom Grad der Überlappung der beiden Eingangssignale ab, sondern auch noch von deren Amplitude. Diese Amplitudenabhängigkeit kann durch die Verwendung eines balancierten Kreuz-Korrelators deutlich vermindert werden, in dem zwei Frequenzverdopplungen parallel durchgeführt werden. Dies wird so realisiert, dass eine zeitliche Verschiebung der beiden optischen Pulszüge gegeneinander zu einem Anwachsen des ersten frequenzverdoppelten Signals führt und zu einer Abnahme des zweiten. Das Differenzsignal verschwindet bei Gleichzeitigkeit, und zwar unabhängig von Amplitudenschwankungen der Eingangspulse.

In Zusammenarbeit mit dem MIT wurde ein balancierter optischer Kreuz-Korrelator für das optische Synchronisationssystem entwickelt, siehe Abbildung 95. Als frequenzverdoppelndes Medium wird ein periodisch gepolter KTP-Kristall vom Typ II verwendet,

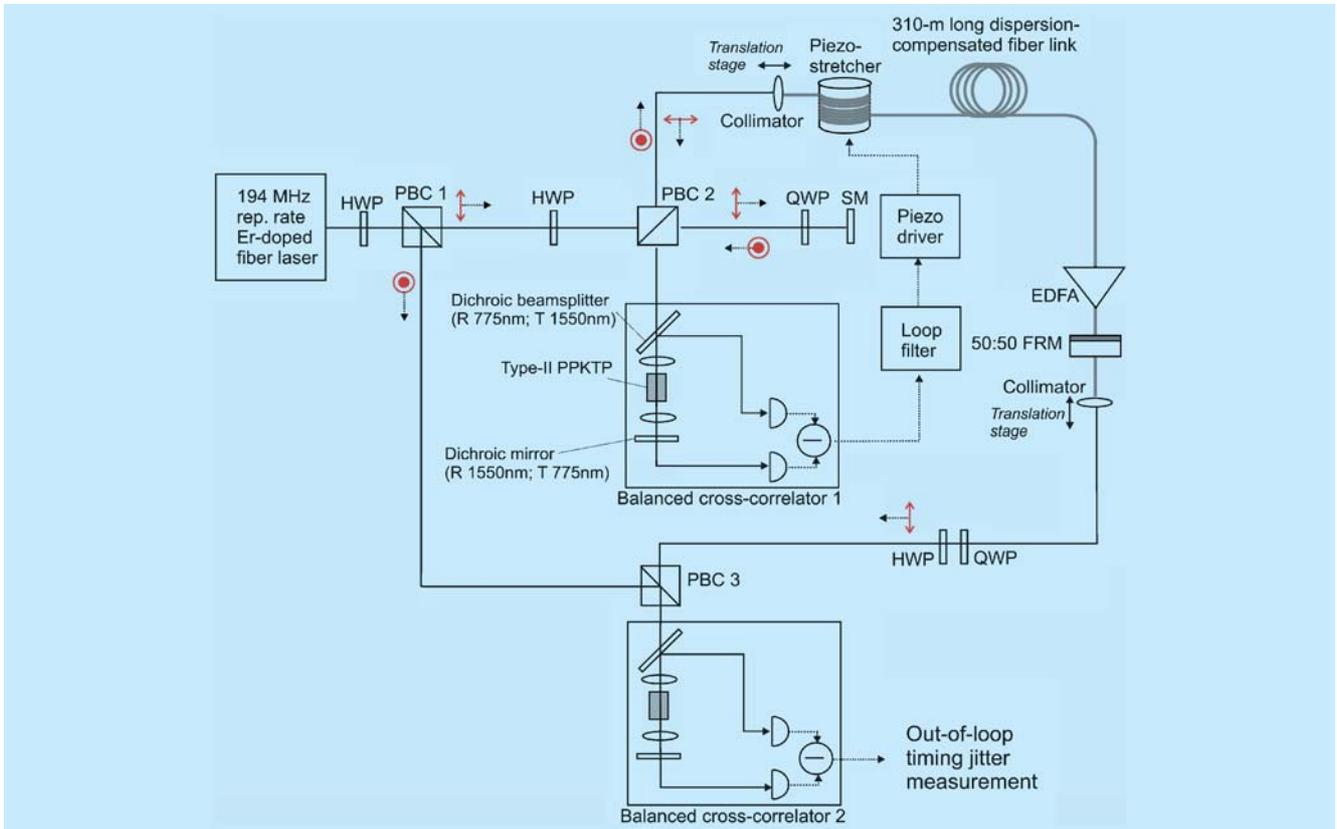


Abbildung 96: Aufbau zur Stabilisierung der optischen Länge einer Glasfaserleitung.

bei dem eine Frequenzverdopplung nur dann stattfindet, wenn orthogonale Polarisationen zum zeitlichen Überlapp gebracht werden. Dies hat den Vorteil, dass die Kreuz-Korrelation untergrundfrei stattfindet, was den Signal-Rauschabstand erhöht. Das frequenzverdoppelte Signal wird über einen dichroitischen Spiegel ausgekoppelt. Die Pulse der Grundfrequenz werden an diesem Spiegel reflektiert und durchlaufen den KTP-Kristall ein weiteres Mal, wobei sie das zweite frequenzverdoppelte Signal erzeugen.

Bei Tests konnte eine Auflösung des Kreuz-Correlators von deutlich unter 10 fs erreicht werden. Wichtige Anwendungen des Kreuz-Korrelators sind die Längenstabilisierung der Glasfaserverbindungen im Beschleuniger, die hochpräzise Vermessung der Synchronisation zweier Faserlaser sowie Phasenrauschenanalysen von Erbium-dotierten Faserlasern und -Verstärkern.

Längenstabilisierung einer Glasfaserleitung

Ein Testaufbau für die Stabilisierung der optischen Länge einer dispersionskompensierten Glasfaserleitung ist in Abbildung 96 dargestellt. Ein Teil des übertragenen Lasersignals wird am Ende der Glasfaser über einen teilweise durchlässigen Faraday-Spiegel reflektiert (der durchlaufende Anteil steht für Synchronisationsaufgaben zur Verfügung). Durch den Faraday-Spiegel wird die Polarisation um 90° gedreht. In einem Kreuz-Korrelator wird die zeitliche Lage der reflektierten und der direkt aus dem Referenzlaser kommenden Pulse verglichen. Dieser Vergleich liefert das Regelsignal für einen piezo-elektrisch betriebenen Faserstretcher, mit dem die optische Länge der Leitung aktiv nachgeregelt wird.

Als Referenzlaser wurde ein Solitonlaser bei einer Repetitionsrate von ca. 200 MHz verwendet. Dieser bietet gegenüber *stretched-pulse* Lasern mit 50 MHz Repetitionsrate den Vorteil eines schmaleren optischen Spektrums, was die Dispersionskompensation in der Faser vereinfacht. Weiterhin kann bei gleicher Nichtlinearität eine vierfach höhere Leistung übertragen werden, wodurch das Signal des Kreuz-Korrelators einen Faktor vier besser ist.

Die Stabilität der Regelung wurde mit einem zweiten Kreuz-Korrelator vermessen. Die Zeitschwankungen (*time jitter*) liegen bei 9 fs (rms). Damit sind die Vorgaben für den ILC und den XFEL erreicht worden.

Die hervorragende Genauigkeit und Stabilität des Kreuzkorrelators und der Glasfiber-Leitung sind von großem Nutzen für das geplante Rückkopplungssystem bei FLASH, mit dem die Strahlenergie stabilisiert werden soll.