

Forschung Teilchenphysik

Inhalt

H1-Experiment	53
ZEUS-Experiment	63
HERMES-Experiment	75
HERA-B-Experiment	87
Theoretische Physik	91
Aktivitäten in Hamburg	92
Aktivitäten in Zeuthen	106
Aktivitäten am NIC	110
Astroteilchenphysik	113
International Linear Collider	119
Forschung Linearbeschleuniger-Technologien	137

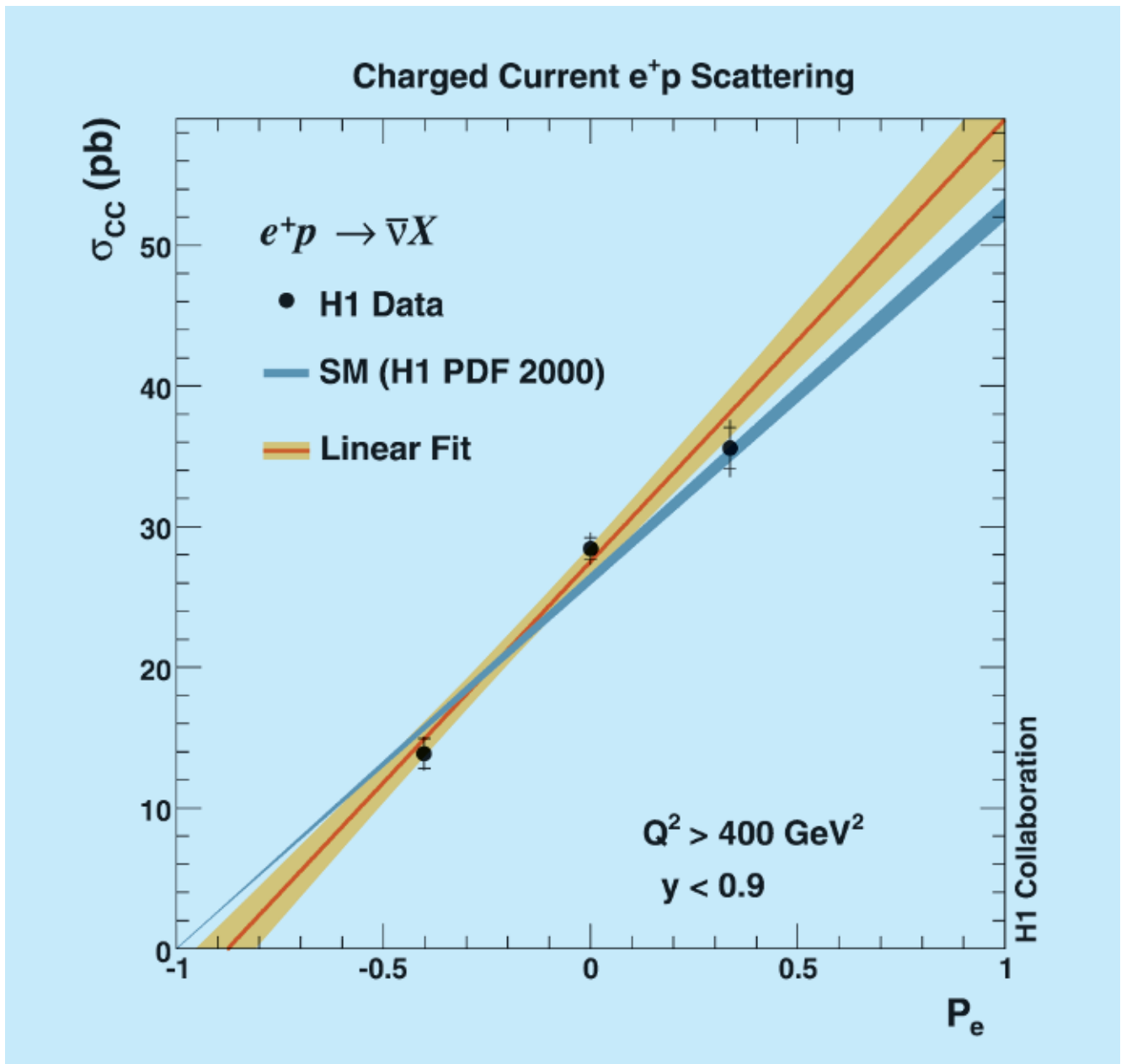


Abbildung 13: Die Abhängigkeit des inklusiven Wirkungsquerschnitts für die charged current Wechselwirkung $e^+p \rightarrow \bar{\nu}X$ vom Polarisationsgrad des Positronstrahls. Im Vergleich zu den H1-Datenpunkten ist die Vorhersage des Standardmodells unter Verwendung der H1 PDF 2000 Partondichtefunktionen dargestellt, sowie ein Geradenfit an die Messwerte.

H1-Experiment

Beteiligte Institute: RWTH Aachen, Univ. Antwerpen, Univ. of Birmingham, Inter-Univ. ULB-VUB Brussels, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Inst. for Nucl. Phys. Cracow, Univ. Dortmund, JINR Dubna, CEA Saclay, DESY und Univ. Hamburg, Univ. und MPI Kernphys. Heidelberg, Univ. Kiel, Slovak Acad. Sci. Košice, Univ. of Lancaster, Univ. of Liverpool, QMWC London, Univ. of Lund, Univ. of Manchester, Univ. Marseille, 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, Paul Scherrer Inst. Villigen, Univ.-GH Wuppertal, Phys. Inst. Yerevan, DESY Zeuthen, ETH und Univ. Zürich.

Sprecher: M. Klein, DESY

Das Jahr 2005 war für die H1-Kollaboration das bisher erfolgreichste Jahr seit dem Beginn der Datennahme 1992. In einer bis Ende 2005 ununterbrochenen, langen Phase des HERA Betriebs, konnte das H1-Experiment mehr als 100 pb^{-1} an guten Daten aufzeichnen, etwa so viel, wie insgesamt in der HERAI Periode registriert wurde. HERA lieferte ohne größere Störungen Daten mit hohen Elektron- und Protonströmen sowie einer spezifischen Luminosität, die etwa viermal so hoch war wie vor dem so genannten *Luminosity Upgrade*, der im Jahr 2001 durchgeführt wurde. Waren die ersten Jahre der HERA II Phase noch durch zum Teil sehr hohen Strahluntergrund gekennzeichnet, so verbesserten sich das Vakuum in der Nähe der H1-Wechselwirkungszone sowie die Stabilität des HERA Betriebs gegenüber 2003/04 wesentlich. Neben den verbesserten Strahlbedingungen ist es wichtig hervorzuheben, dass der H1-Detektor zuverlässig lief, so zum Beispiel mit stabilen und sorgfältig optimierten Triggerbedingungen, so dass das Jahr 2005 Daten hoher Qualität erbracht hat. Ein Teil dieser Daten konnte daher bereits im Frühjahr 2006 in Japan auf der alljährlichen Spezialkonferenz über Tiefinelastische Physik und Quantenchromodynamik vorgestellt werden, so

z. B. Ergebnisse zur Suche nach neuen Teilchen und zur Messung der inklusiven Streuquerschnitte.

Im Unterschied zur ersten Phase von HERA werden jetzt Kollisionen von longitudinal polarisierten Leptonen mit Protonen aufgezeichnet. Durch den Sokolov-Ternov-Effekt werden im Ringbeschleuniger die Elektronen oder Positronen transversal polarisiert. Durch die im Jahr 2001 vor und hinter den ep-Wechselwirkungspunkten eingebauten Spin-Rotatoren wird die Spinorientierung longitudinal ausgerichtet und damit zu einer für Tests der schwachen Wechselwirkung zugänglichen Größe. Erstmals konnte somit die Abhängigkeit des Streuquerschnitts der geladenen Stromwechselwirkung vom Polarisationsgrad des Positronstrahls in der Reaktion $e^+p \rightarrow \bar{\nu}X$ gemessen werden. Die gemessene lineare Abhängigkeit dieses Streuquerschnitts ist ein Resultat für Lehrbücher der schwachen Wechselwirkung. Das in Abbildung 13 dargestellte Ergebnis ist zudem Inhalt der ersten H1-Publikation mit HERA II-Daten.

HERA wird im Jahr 2007 seinen Betrieb einstellen. Die H1-Kollaboration nahm dies zum Anlass, ihr Physikprogramm für die verbleibende Messzeit in seinen wesentlichen Konturen zu definieren. Die Physik der Elektron-Proton-Streuung wird bei H1 in drei wesent-

liche, miteinander zusammenhängende Kapitel gegliedert: i) Präzisionsmessungen zur Partonstruktur des Protons; ii) Untersuchungen zu den Gesetzmäßigkeiten der Partondynamik im Bereich hoher Quark- und Gluondichten (*low x physics*) sowie iii) Suche nach neuen Phänomenen, Teilchen oder seltenen Ereignissen bei großen Skalen oder auch neuen Ansätzen in der QCD, wie die Tief Virtuelle Comptonstreuung (DVCS). Alle diese Untersuchungen sind von großer Bedeutung, nicht nur für das Verständnis der Protonstruktur und der starken Wechselwirkung an sich, sondern auch für die Physik am Large Hadron Collider (LHC), was den Erfolg des von H1 Physikern maßgeblich mitgestalteten HERA-LHC-Workshops erklärt.

Die bisher größte Abweichung von den Vorhersagen des Standardmodells ergab die Analyse von Ereignissen, in denen isoliert auftretende Leptonen, verbunden mit großen nicht-balancierten Transversalimpulsen beobachtet werden. Während deren Häufigkeit die Erwartung des Standardmodells im Fall der Positron-Protonstreuung mit einer Signifikanz von 3.4 Standardabweichungen übertrifft, ergab die Analyse der Elektron-Protondaten des Jahrs 2005 keine Abweichung von der Vorhersage. Um diese Frage aufklären zu können, spricht sich die H1-Kollaboration dafür aus, eine möglichst lange Datennahmeperiode mit Positronen vorzusehen. Ferner führten detaillierte Studien der Kollaboration zu dem Vorschlag, für eine begrenzte Dauer Daten mit erniedrigter Protonstrahlenergie zu nehmen. Dies eröffnet die Möglichkeit, die longitudinale Protonstrukturfunktion, F_L , die zweite fundamentale Strukturfunktion des Protons, zu messen. Die geplante Messung wird Rückschlüsse auf die Gültigkeit der Theorie und speziell das Verhalten der Gluondichte in diesem Teil des Phasenraums erlauben. Mit diesen Plänen sowie dem übergeordneten Ziel, die maximale Menge an Messdaten bis 2007 aufzuzeichnen, steht die Datennahme bei HERA vor ihrem nun absehbaren Abschluss. Angesichts der Tatsache, dass HERA in der verbleibenden Zeit noch eine erhebliche Datenmenge zu liefern verspricht, gelten alle Anstrengungen der Sicherung höchster Qualitätsansprüche, was die Detektoren, Trigger und Onlinesoftware angeht.

Ende 2005 wurde die Datennahme unterbrochen, um bei HERA mehrere große Dipolablenkmagnete (*BU Magnete*) auszutauschen. H1 konnte diese Betriebsunterbrechung dazu nutzen, die in sehr kurzer Zeit in Zeuthen neu aufgebauten Siliziumstreifendetektoren BST und FST wieder zu installieren, die, wie im Vorjahr berichtet, wegen Wasser- bzw. Strahlungsschäden ausgebaut worden waren. Darüber hinaus wurden mehrere andere Komponenten verbessert (wie das ToF System), repariert (CST, CIP) oder teilweise mit neuer Elektronik (SPACAL) ausgerüstet.

Im Jahr 2005 entwickelte sich die Kollaboration kontinuierlich weiter. Kürzlich neu aufgenommene Gruppen fanden ein eigenes Profil und weitere Gruppen haben Interesse bekundet, der H1-Kollaboration beizutreten. Auf diese Weise ist es gelungen, die Anzahl der Autoren nahezu konstant zu halten. Die Analyse aller HERA-Daten ist ein anspruchsvoller Prozess, der noch mehrere Jahre andauern wird. Mitglieder der Kollaboration hielten in 2005 etwa 100 Vorträge auf internationalen Konferenzen, H1 reichte etwa 50 Beiträge zur Europäischen Teilchenphysikkonferenz in Lissabon ein und publizierte im Jahr 2005 in Fachzeitschriften weitere zehn wissenschaftliche Beiträge, die weiter unten kurz vorgestellt werden.

Mit Modellen und Einführungen zum Tag der offenen Tür, der Betreuung der Sommerstudenten sowie von Schülerpraktikanten beteiligte sich die Kollaboration an der Ausbildung von jungen Menschen und Werbung für die Teilchenphysik.

Der H1-Detektor

Datennahme

Nach mehreren Jahren Kollisionen von Positronen und Protonen wurde HERA Ende 2004 erstmals wieder auf Elektron-Proton Streuung umgeschaltet. Die Vakuumbedingungen im Jahr 2005 erwiesen sich als ausreichend gut, um nicht nur einen stabilen Betrieb aufrecht zu erhalten, sondern mehr als doppelt so viel integrierte Luminosität im Vergleich zum vorhergehenden Jahr

aufzuzeichnen. Die für Analysen zur Verfügung stehende Datenmenge von HERA II bei H1 wurde damit ungefähr verdreifacht. Die Richtung der longitudinalen Polarisation der Elektronen wurde in dieser Datenperiode dreimal geändert, um eine möglichst gleichmäßige Aufteilung der Datenmenge auf beide Ausrichtungen zu gewährleisten. In der Datennahmeperiode 2005 zeichnete H1 eine integrierte Luminosität von 156 pb^{-1} auf, davon konnten für 117 pb^{-1} die zentralen Spurkammern mit nomineller Hochspannung betrieben werden. Zu Beginn war die Effizienz der Datennahme noch etwas beeinträchtigt, da nach dem Einbau eines neuen Strahlrohrstücks in der Wartungsperiode 2004 das Vakuum konditioniert werden musste. Ein Leck im Strahlrohr, 14 m vor dem H1-Experiment aus Protonrichtung gesehen, verzögerte die Konditionierung zwischenzeitlich um einige Wochen. Zudem erzeugten Strahlinstabilitäten kurze Spitzen in den Untergrundraten und führten zu gelegentlichen Notabschaltungen der Hochspannung der Spurkammern, die notwendig waren, um diese empfindlichen Detektoren vor Schäden zu schützen. Da als Ursache für die Strahlinstabilitäten Alterungserscheinungen der vertikalen Protonablenkmagnete identifiziert werden konnten, wurde beschlossen, alle Magneten dieses Typs auszutauschen. Die notwendige Neuanfertigung dieser BU-Magnete erforderte es, die ursprünglich für Ende August vorgesehene Wartungsperiode auf Mitte November zu verschieben. Die Datennahmeeffizienz von H1 war mit 95% hoch und die inhärente Totzeit des Triggersystems war mit 9.5% nur unwesentlich höher als die angestrebten 8%. Die Hochspannungseffizienz der zentralen Spurkammern erreichte nach Überwindung der Anfangschwierigkeiten wieder Werte von 80% und mehr. Die Detektor-komponenten von H1 arbeiteten zuverlässig.

Der 2004 installierte Fast Track Trigger (FTT) wurde in den Triggerstufen L1 und L2 während der Datennahme vollständig in Betrieb genommen. Die Triggerstufe L3 wurde für den Betrieb vorbereitet. Das Very Forward Proton Spektrometer (VFPS) wurde erfolgreich in Betrieb genommen und erste Spektren der unter kleinem Winkel gestreuten Protonen aus diffraktiven e-p Streueignissen wurden aufgezeichnet. Im Betrieb des zentralen Siliziumdetektors (CST) traten zunächst

Probleme mit der Ausleseelektronik auf, die durch Einbau neuerer Prozessoren behoben werden konnten. Im weiteren Verlauf des Jahrs zeigten, bedingt durch Kontaktprobleme und defekte Frontendelektronik, einige der 64 Detektoren Ausfallerscheinungen. Die für das H1-Triggersystem unerlässliche zentrale innere Proportionalkammer (CIP) war in der gesamten Datennahmeperiode funktionsfähig. Lediglich in einem Azimut-Sektor war die Redundanz der insgesamt fünf Lagen durch einen teilweisen Ausfall der Frontendelektronik etwas beeinträchtigt. Das SPACAL Kalorimeter, das in Rückwärtsrichtung elektromagnetische Energie misst, zeigte in einigen Auslesekanälen Schwächen in der Signalstärke, die sich auch nicht mehr durch eine Korrektur der Hochspannung alleine kompensieren ließen.

Reparaturen und Erweiterungen

Mit Beginn der Wartungsperiode Mitte November wurden der H1 Detektor geöffnet und einige Detektorkomponenten zur Reparatur ausgebaut. Um Zugang zum zentralen Siliziumdetektor zu erhalten, sowie alle drei Siliziumdetektoren (FST, BST, CST) nach erfolgter Reparatur wieder einbauen zu können, musste das Strahlrohr bei H1, wie schon 2004, geöffnet werden. Um die Vakuumbedingungen möglichst gut zu erhalten, wurde das Strahlrohr mit Stickstoff gespült und die ausgebauten Strahlrohrkomponenten unter Vakuumbedingungen gelagert. Zwölf der insgesamt 40 Elektronikarten der CIP wurden repariert. Bis auf eine Ausnahme wurden damit alle Probleme mit der Ausleseelektronik behoben. Beim SPACAL Kalorimeter wurden 40 Photomultiplier mit zu geringem Verstärkungsfaktor ersetzt oder repariert. Der CST wurde neu verkabelt und die defekten elektronischen Bauteile wurden ausgetauscht, wodurch alle Fehler behoben werden konnten. Die in der Wartungsperiode 2004 wegen Wasser- und Strahlenschäden ausgebauten Forward und Backward Silizium Detektoren (FST und BST) wurden in Zeuthen mit Unterstützung von ZE Hamburg neu aufgebaut. Beim FST wurden neue Sensoren hergestellt sowie die elektronischen Komponenten in strahlungsresistentem Design entwickelt und in kurzer Zeit neu gefertigt.

Der BST erhielt ebenfalls strahlungsresistente Elektronikkomponenten und eine verbesserte Kühlung. Beide Detektoren wurden wie geplant wieder in den Zentraldetektor eingebaut. Zwischen CST und FST wurde ein neuer Szintillationszähler als Strahlungsmonitor eingebaut. Die Segmentierung dieses scheibenförmigen Zählers in zwei radiale Ringe und 16 Azimut-Sektoren ermöglicht zudem die Erweiterung des H1-Triggers in Vorwärtsrichtung. Alle Reparaturarbeiten wurden erfolgreich im gesetzten Zeitrahmen abgeschlossen, die Detektoren eingebaut und getestet. Wesentlich war hierbei, den Zeitplan für das Verschließen des Strahlrohrs vor der Weihnachtspause einzuhalten, so dass das Konditionieren des Vakuums noch im Dezember beginnen konnte.

Physikalische Ergebnisse

Quantenchromodynamik

HERA bietet optimale Voraussetzungen, sämtliche Facetten der QCD zu studieren. Neben Tests der harten Streuprozesse bei hohen Skalen geraten zunehmend auch darüber hinausgehende Gebiete in das Zentrum des Interesses: der Übergang zum nicht-perturbativen Bereich, Hadronisierung und Effekte der Partondynamik jenseits des DGLAP-Formalismus seien hier als Beispiele genannt.

Eine Veröffentlichung im Berichtszeitraum untersucht das Zusammenspiel zwischen perturbativer und nicht perturbativer QCD, durch das Studium von fünf unterschiedlichen, auch in anderen Experimenten untersuchten Ereignisformvariablen in der tiefinelastischen Streuung und bei hohen Impulsüberträgen $\langle Q \rangle$ von 16–116 GeV. Diese Observablen, unter anderem *Thrust* und *Jet Broadening*, charakterisieren die geometrischen Eigenschaften des hadronischen Energieflusses als z. B. kollimiert, isotrop, etc. und zeichnen sich folglich durch Sensitivität auf die perturbative QCD (beschrieben durch Matrixelemente des harten Streuprozesses und die starke Kopplung α_s) einerseits und die Hadronisierung andererseits aus. Die Messung hat vergleichsweise kleine experimentelle Unsicherheiten,

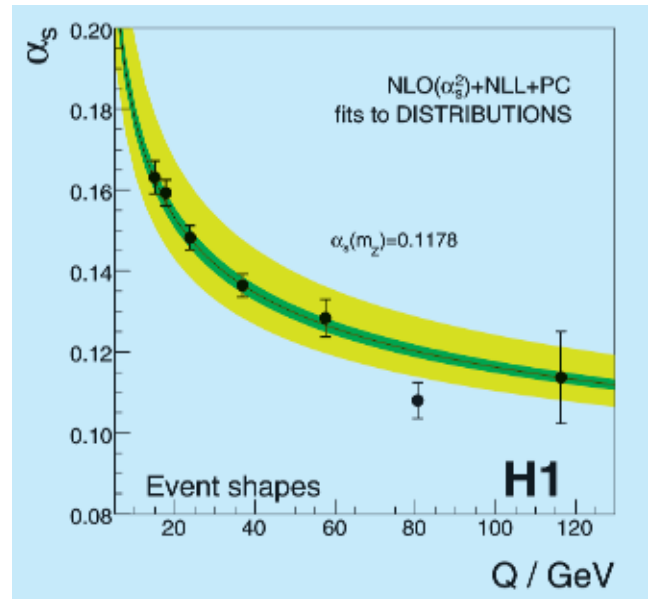


Abbildung 14: Die starke Kopplung α_s als Funktion der Skala Q . Das innere (äußere) schattierte Band repräsentiert die Unsicherheit des Mittelwerts der sieben Einzelbestimmungen durch experimentelle (theoretische) Ursachen.

da sie unempfindlich gegenüber der absoluten Skala der hadronischen Energie ist und keine Beschränkung auf eine minimale transversale Energie impliziert. Die differentiellen Verteilungen der Ereignisformvariablen werden durch eine Theorievorhersage gut beschrieben, die den perturbativen Teil in nächstführender Ordnung, ergänzt um eine Resummation (NLO+NLL), behandelt. Effekte der Hadronisierung werden durch Potenzkorrekturen (PC) proportional zu $1/Q$ berücksichtigt. Im Gegensatz zu Hadronisierungsmodellen basieren diese Potenzkorrekturen auf einem analytischen Ansatz und sind außer von $\alpha_s(m_Z)$ nur von einem einzigen freien Parameter, α_0 , abhängig. Ein Fit der freien Parameter der Theorie, $\alpha_s(m_Z)$ und α_0 , ergibt konsistente Werte für alle fünf untersuchten Ereignisformvariablen. Abbildung 14 zeigt die Evolution der starken Kopplung $\alpha_s(Q)$ mit der Skala. Der sich ergebende Wert $\alpha_s(m_Z)$ ist innerhalb der Unsicherheiten kompatibel mit dem Weltmittelwert. Die erhaltenen Werte von α_0 sind vereinbar mit dem von anderen Untersuchungen bei HERA und LEP. Dies unterstreicht den Erfolg von Powerkorrekturen als Alternative zu klassischen

Hadronisierungsmodellen bei der Beschreibung von Ereignisformvariablen.

Obwohl der Anstieg der Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ mit wachsendem Q^2 bei kleinem x seit den ersten HERA Messungen inzwischen genau vermessen wurde, sind die theoretischen Konsequenzen dieses Effektes nicht vollständig geklärt. Zum einen lassen sich die Daten hervorragend mit dem DGLAP Formalismus in nächstführender Ordnung in der QCD beschreiben, zum anderen gilt aber auch als sicher, dass dieser Formalismus nur eine Approximation darstellt und Abweichungen nicht überraschend wären. Um die Details der Entwicklung der Protonstruktur genauer untersuchen und verstehen zu können, wurde eine spezielle Messung der so genannten *forward jets* vorgeschlagen. Es werden Ereignisse der tiefinelastischen Streuung bei kleinen x mit $Q^2 > 5 \text{ GeV}^2$ selektiert, welche zusätzlich einen hochenergetischen Jet mit Transversalimpuls $p_t > 3.5 \text{ GeV}$ und $E_{\text{jet}} > 29 \text{ GeV}$ (mit Energiebruchteil $x_{\text{jet}} = E_{\text{jet}}/E_p > 0.35$) im Vorwärtsbereich des Detektors ($7^\circ < \Theta_{\text{jet}} < 20^\circ$) aufweisen. Durch den Vorwärtsjet wird eine harte Skala zusätzlich zu Q^2 definiert. Durch die Bedingung $0.5 < p_{t,\text{jet}}^2/Q^2 < 5$ wird erreicht, dass der Beitrag zum Wirkungsquerschnitt, welcher von der DGLAP Entwicklung (Entwicklung der Partonverteilung von kleiner zu großer Skala) kommt, klein bleibt, was es erlaubt, die Partonentwicklung zwischen großem x_{jet} und kleinem x genau zu studieren. In Abbildung 15 ist der gemessene Wirkungsquerschnitt mit theoretischen Vorhersagen im DGLAP Bild in nächstführender Ordnung (NLO) verglichen, wobei ein signifikanter Unterschied zur Messung bei kleinen x auffällt. Ähnliche Ergebnisse wurden schon 1998 publiziert, jedoch mit wesentlich größeren statistischen Fehlern. Die Messung der *forward jets* wurde erweitert, indem zusätzlich zum Vorwärtsjet noch zwei Jets im zentralen Bereich des Detektors verlangt wurden. Damit kann die Entwicklung der Partondichten und die Partonabstrahlung noch detaillierter untersucht werden. Auch hier zeigt sich, dass Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO für drei Jets) die Messungen nicht vollständig beschreiben können. Insgesamt wird deutlich, dass zusätzliche Effekte in den Berechnungen berücksichtigt werden müssen, sei es durch Erweiterung der Entwicklung der

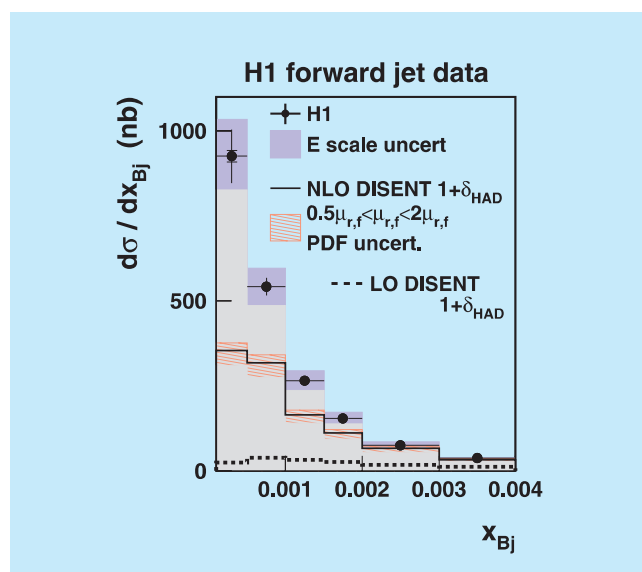


Abbildung 15: Wirkungsquerschnitt für die forward jet Produktion als Funktion von Bjorken- x , verglichen mit Rechnungen in nächstführender Ordnung (NLO).

Partonabstrahlung oder durch Hinzunahme von Beiträgen höherer Ordnung, welche beide Konsequenzen der hohen Gluondichte bei kleinen x sind.

Während Messungen von inklusiven Wirkungsquerschnitten im Wesentlichen zur Bestimmung der longitudinalen Impulsverteilung der Partonen im Proton benutzt werden können, ist die transversale Verteilung der Partonen durch diese Messungen weitgehend unbestimmt. Prozesse mit Vektormesonen V , wie $\gamma^* p \rightarrow V p$, in welchen das einlaufende Proton nicht zerstört wird, sind geeignet, diese zusätzlichen Freiheitsgrade zu bestimmen. Ein besonderer Fall ist der Prozess $\gamma^* p \rightarrow \gamma p$ (DVCS), wobei nur das Photon im Detektor nachgewiesen wird. Dieser Prozess ist besonders interessant, da viele theoretische Unsicherheiten, wie die Unbestimmtheit der Mesonwellenfunktion, entfallen. Die theoretischen Vorhersagen wurden in den letzten Jahren signifikant verbessert und erlauben heute den Vergleich mit so genannten *generalisierten* Partondichteverteilungen, welche Korrelationen zwischen einzelnen Partonen im Proton wie auch die transversale Bewegung der Partonen im Proton beinhalten. In einer Veröffentlichung wurde der Wirkungsquerschnitt für DVCS im Bereich von Impulsüberträgen $2 < Q^2 < 80 \text{ GeV}^2$ und Photon-

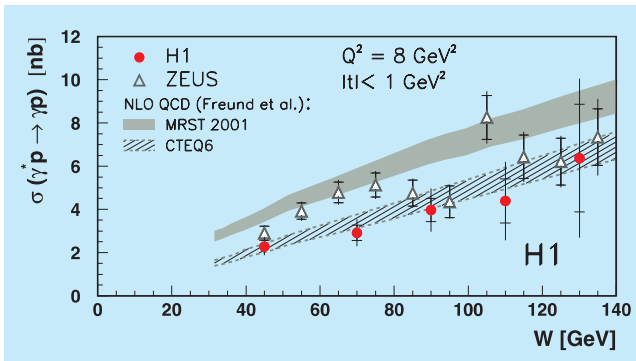


Abbildung 16: Von H1 und ZEUS gemessener Wirkungsquerschnitt für DVCS als Funktion von W , verglichen mit QCD Rechnungen in nächst-führender Ordnung (NLO).

Proton Schwerpunktsenergien $30 < W < 140$ GeV bestimmt. Abbildung 16 zeigt den Wirkungsquerschnitt als Funktion von W im Vergleich mit einer theoretischen Vorhersage in NLO QCD. Zwei unterschiedliche Parametrisierungen der Partonverteilungen geben beide eine gute Beschreibung des Anstiegs mit W , nur die absolute Normierung unterscheidet sich, wobei die H1-Daten die CTEQ6 Parametrisierung bevorzugen.

Physik schwerer Quarks

Erzeugung und Zerfall schwerer Quarks (Charm und Beauty) bei HERA sind von besonderem Interesse für die Untersuchung der QCD und insbesondere der Protonstruktur. Der größte Teil des totalen hadronischen Streuquerschnitts wird von langreichweitigen Wechselwirkungen (*soft interactions*) bestimmt, für die noch keine befriedigende Beschreibung im Rahmen der QCD vorliegt. Die elastische Photoproduktion von Vektormesonen $\gamma p \rightarrow V p$ ist ein spezielles Beispiel für einen solchen Prozess. Hierbei geht das Proton praktisch unverändert aus der Kollision mit dem Photon hervor. Es findet ein farbloser Austausch eines so genannten Pomerons statt, eines hypothetischen Teilchens mit den Quantenzahlen des Vakuums. Ein solcher farbloser Austausch kann in der QCD in einfacher Form als Austausch zweier Gluonen beschrieben werden, die jedoch miteinander stark wechselwirken. Ein Modell für diesen Prozess

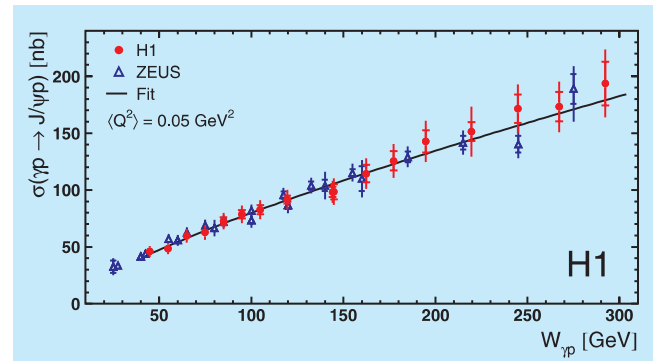


Abbildung 17: Der totale Wirkungsquerschnitt für elastische Photoproduktion von J/Ψ Mesonen als Funktion der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems $W_{\gamma p}$. Die durchgehende Linie zeigt eine Anpassung an die H1-Daten.

wurde von Martin, Ryskin und Teubner (MRT) entwickelt und hier getestet. Es wurden die Wirkungsquerschnitte für die elastische Produktion von J/Ψ Mesonen in Photoproduktion und in Elektroproduktion für Impulsüberträge Q^2 bis 80 GeV^2 gemessen und deren Abhängigkeit von der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems $W_{\gamma p}$ bestimmt. Die leptonenischen Zerfallsprodukte der J/Ψ Mesonen wurden in verschiedenen Detektoren von H1 identifiziert. Abbildung 17 zeigt den totalen Wirkungsquerschnitt für elastische Photoproduktion von J/Ψ Mesonen als Funktion der invarianten Energie des Photon-Proton-Systems $W_{\gamma p}$ zusammen mit einem Fit an die H1-Daten. Es wurde gezeigt, dass das Modell von MRT eine hohe Sensitivität der Daten auf die Gluondichte des Protons aufweist, besonders im Bereich niedriger Bjorken- x und Q^2 . Weiterhin wurde gezeigt, dass die Produktion von J/Ψ Mesonen und ihre Zerfallswinkelverteilungen konsistent mit der Erhaltung der Helizität im s -Kanal sind.

Der dominante Mechanismus der Erzeugung schwerer Quarks bei HERA ist die so genannte Boson-Gluon Fusion, bei der die Wechselwirkung des vom Elektron abgestrahlten Photons mit einem Gluon aus dem Proton zur Bildung eines schweren Quark-Antiquark-Paars führt. In vorhergehenden Arbeiten zu diesem Thema wurde in der Regel nur die Existenz eines der beiden bei der Boson-Gluon Fusion entstandenen Quarks nach-

gewiesen. Die klassische Methode zum Nachweis von Charmteilchen bei HERA besteht in der Rekonstruktion eines D^* -Mesons, das über den Zwischenzustand eines neutralen D^0 -Mesons in die Endzustandsteilchen $K\pi\pi$ zerfällt. Hingegen benutzen viele Arbeiten zur Beauty-Produktion die semi-leptonischen B-Zerfälle mit einem Myon im Endzustand. In einer Arbeit wurden nun Photoproduktionsereignisse untersucht, die sowohl ein D^* als auch ein Myon enthalten. Obwohl diese zusätzliche Bedingung zunächst zu einer reduzierten Nachweiswahrscheinlichkeit führt und daher die Analyse der gesamten HERA I-Daten erforderlich macht, erlauben die so selektierten Ereignisse weiterreichende Tests der perturbativen QCD in NLO. Die Zuordnung zwischen Myon und D^* zu b-Quark, bzw. c-Quark ist nicht eindeutig, da auch c-Quarks semi-leptonisch zerfallen können und b-Quarks häufig über den Zwischenzustand Charm zerfallen. So kommt es vor, dass sowohl das nachgewiesene Myon, als auch das D^* -Meson aus dem Zerfall ein und desselben b-Quarks stammen. Um die einzelnen Beiträge von Charm und Beauty voneinander separieren zu können, muss man daher ihre unterschiedlichen Korrelationen zwischen dem Öffnungswinkel zwischen D^* und Myon und dem Produkt ihrer elektrischen Ladung ausnutzen. In führender Ordnung beträgt der Öffnungswinkel zwischen den beiden schweren Quarks exakt 180° , während in nächstführender Ordnung die Abstrahlung von harten Gluonen zu einer signifikanten Abweichung von diesem Wert führen kann. Der auf diese Weise bestimmte Wirkungsquerschnitt für Charm stimmt gut mit den NLO QCD Vorhersagen überein, während der gemessene Beauty-Wirkungsquerschnitt höher ist als erwartet. Da in dieser Analyse im Gegensatz zu früheren Beauty-Analysen keine hochenergetischen Jets verlangt werden, ist der gemessene kinematische Bereich durch niedrigere $b\bar{b}$ Schwerpunktsenergien gekennzeichnet. Der Vergleich des Verlaufs von gemessenen differentiellen Verteilungen zeigt im Allgemeinen gute Übereinstimmung mit QCD Rechnungen, die die Effekte von höheren Ordnungen berücksichtigen.

Eine weitere Veröffentlichung schließt unmittelbar an eine im vorangegangenen Berichtsjahr veröffentlichte Analyse an. In einer inklusiven Analyse der

Zerfallslängen wurde der zentrale Siliziumstreifen-Detektor (CST) dazu verwendet, Ereignisse mit Charm- und Beauty-Teilchen anzureichern und deren relative Anteile zu bestimmen, ohne explizit einzelne D- oder B-Mesonen zu rekonstruieren. In der neuen Analyse wurde der kinematische Bereich der tief-inelastischen Streuung zu kleineren Q^2 -Werten, $12 < Q^2 < 60 \text{ GeV}^2$, hin erweitert. Da in diesem Bereich die Produktion von Charm und Beauty relativ zu den leichten Quarks noch stärker unterdrückt ist als für höhere Q^2 , ist die Bestimmung ihres Anteils experimentell schwieriger. Dennoch gelang mit dieser Methode die Messung der Beiträge zur Strukturfunktion, F_2^c und F_2^b , im Bereich kleiner Q^2 und kleiner x . Für F_2^b stellt dies die erste Messung in diesem kinematischen Bereich dar. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den theoretischen Erwartungen der QCD überein.

In einer weiteren Analyse, die sich mit der Produktion von schweren Quarks beschäftigt, wurden Beauty-Ereignisse selektiert, indem Myonen von semileptonischen Zerfällen rekonstruiert wurden. Des Weiteren wurden im Bereich der tief-inelastischen Streuung (DIS, $2 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$) ein Jet und im Bereich der Photoproduktion (γp , $Q^2 \simeq 0$) zwei Jets im Ereignis verlangt. Um eine gegebene Reaktion störungstheoretisch innerhalb der QCD behandeln zu können, ist mindestens eine harte Skala im Prozess erforderlich. Für die Beauty-Produktion ist dies allein schon durch die hohe Masse des b-Quarks von ca. 5 GeV gewährleistet. Interessante Fragestellungen ergeben sich, wenn mehrere harte Skalen in einem Prozess auftreten. In einer Analyse konnte nun unter anderem untersucht werden, wie der Übergang vom Bereich der Photoproduktion zum Bereich der tief-inelastischen Streuung, in dem Q^2 als zusätzliche harte Skala auftritt, theoretisch beschrieben wird. Es wird erwartet, dass in dem untersuchten Bereich nicht zu großer Q^2 perturbative Rechnungen, die im so genannten *massiven Schema* in nächstführender Ordnung der QCD durchgeführt werden, zuverlässige Resultate geben sollten. In diesem Schema nehmen nur die leichten Quarks (u, d und s) als aktive Bestandteile von Proton bzw. Photon an der Wechselwirkung teil, während c- und b-Quarks lediglich dynamisch im Prozess der harten Streuung erzeugt

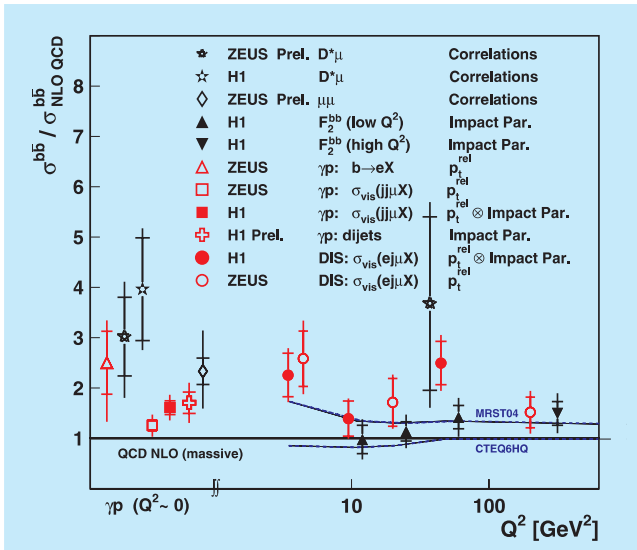


Abbildung 18: Verhältnis gemessener Beauty Erzeugungsquerschnitte zu NLO QCD Vorhersagen für eine Reihe von HERA Messungen als Funktion von Q^2 .

werden. Um Beauty-Ereignisse vom Untergrund aus leichten Quarks und Charm zu separieren, wurden in dieser Arbeit zum ersten Mal zwei Variablen kombiniert, die sowohl die große Masse des b-Quarks als auch dessen lange Lebensdauer ausnutzen. Für eine gute Trennung von Signal und Untergrund ist hier die hervorragende Positionsauflösung des CST von ca. $35 \mu\text{m}$ entscheidend. Abbildung 18 zeigt das Verhältnis von gemessenem Beauty-Wirkungsquerschnitt zu den NLO QCD Vorhersagen für diese und andere Messungen bei HERA als Funktion von Q^2 , wobei auffällt, dass alle bisherigen Beauty-Messungen konsistent etwas oberhalb der theoretischen Vorhersagen liegen.

Physik jenseits des Standardmodells

Der Elektron-Proton Collider HERA bietet wegen der hohen Strahlenergien und der Klarheit der Streueignisse ausgezeichnete Möglichkeiten, nach neuartigen Teilchen zu suchen, deren Existenz in Theorien jenseits des Standardmodells vorhergesagt wird. Wegen der besonders hohen Sensitivität für die Erzeugung der

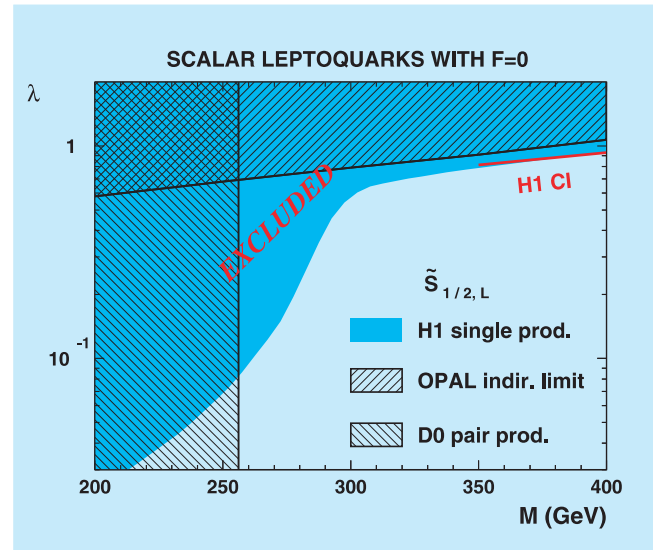


Abbildung 19: Ausschlussgrenzen für die Kopplungsstärke an skalare Leptoquarks λ als Funktion ihrer Masse im Vergleich zu den Ergebnissen von D0 und OPAL.

hypothetischen Leptoquarks wurden in der Vergangenheit bei HERA wiederholt Arbeiten zu diesem Thema veröffentlicht. In einer neuen Veröffentlichung wurden nun die gesamten HERA I-Daten von H1, die einer Luminosität von ca. 120 pb^{-1} entsprechen, mit Hilfe einer neuartigen statistischen Methode analysiert, welche die Empfindlichkeit für diese Suche verbessert. Die Suche geschieht unter der Annahme, dass die in der Kollision entstandenen Leptoquarks entweder wieder in ein Elektron (Positron) und ein Quark oder in ein Neutrino und ein Quark zerfallen. Insgesamt wurde nach 14 verschiedenen Typen von Leptoquarks gesucht. Je nach Typ liefern dabei die e^-p oder die e^+p -Daten größere Empfindlichkeit. Da auch in dieser Analyse keine Evidenz für die Existenz von Leptoquarks gefunden werden konnte, wurden obere Grenzen für die Kopplungsstärke an die untersuchten Leptoquarks als Funktion ihrer Masse abgeleitet. Abbildung 19 zeigt beispielhaft die sich ergebenden Ausschlussgrenzen für skalare Leptoquarks im Vergleich zu den ausgeschlossenen Regionen von Experimenten am LEP und am TEVATRON, die durch die vorliegende Analyse für Massen ab ca. 255 GeV zum Teil deutlich weiter eingeschränkt werden konnten.

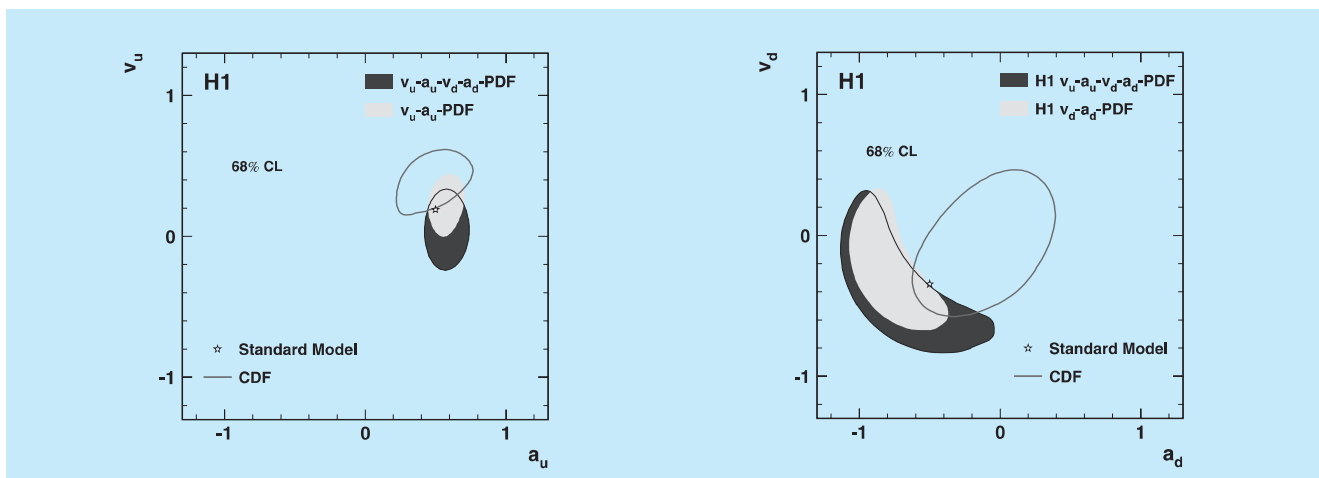


Abbildung 20: Vektor- und Axialvektorkopplungen von u - (links) und d -Quarks (rechts) an das Z Boson. Dargestellt sind die Resultate von H1 im Vergleich mit Ergebnissen der CDF Kollaboration und der Vorhersage des Standardmodells.

Elektroschwache Physik

HERA ist neben LEP/SLC (e^+e^-) und dem Tevatron ($p\bar{p}$) die einzige Beschleunigeranlage, in der bei Energien nahe der Fermiskala von ~ 100 GeV die elektroschwache Wechselwirkung der elementaren Fermionen (Quarks und Leptonen) untersucht wird. Im Bereich so hoher Energien sind die Auswirkungen der schwachen Wechselwirkung gegenüber der elektromagnetischen Wechselwirkung erheblich. Dies ist erkennbar an den messbar großen Beiträgen des Austauschs von geladenen W^\pm Bosonen, in den *charged current reactions* (CC) $e^-p \rightarrow \nu X, e^+p \rightarrow \bar{\nu} X$, mit deren Hilfe flavourabhängige Quarkverteilungen im Proton gemessen werden können. Dies ist ebenso erkennbar an der Zunahme des Austauschs des neutralen Z Bosons (*neutral current reaction* (NC) $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$) relativ zum Photonaustausch. Bei Impulsüberträgen $Q^2 \simeq 2\pi\alpha/G_F \sim M_{W,Z}^2 \sim 10^4 \text{ GeV}^2$ sind die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung etwa gleich groß. Diese Vorhersagen des Standardmodells wurden bei HERA schon in der Vergangenheit qualitativ eindrucksvoll bestätigt. In einer neuen Publikation wurden die ersten signifikanten Tests der elektroschwachen Theorie mit HERA-Daten durchgeführt. LEP wird in der Regel als die eigentliche Präzisions-

maschine zum Test der elektroschwachen Theorie bei hohen Energien angesehen, zumindest für den Leptonsektor. Für HERA, eine ep Maschine, kann das nur dann gelten, wenn gleichzeitig auch die Effekte der starken Wechselwirkung beherrscht werden. Die akkurate Messung sowohl der inklusiven CC- als auch der NC-Streuquerschnitte erlaubt es, die Partonverteilungen der Quarks (Up und Down), der Antiquarks sowie des Gluons allein mit Daten des H1-Experiments zu bestimmen. Darüberhinaus wurde es nun erstmalig möglich, gleichzeitig einen vollständigen Satz von elektroschwachen Parametern bei HERA zu messen: Abbildung 20 zeigt die erste Messung der schwachen Kopplungsparameter der leichten Quarks an das Z Boson. Neben der Bestimmung der *light quark couplings* wurden weitere Messungen fundamentaler Parameter möglich, so des Mischungswinkels $\sin^2\theta_W$ der $SU(2)_L \times U(1)$ Theorie, der Propagatormasse der schwachen Wechselwirkung oder auch eine interessante Abschätzung der Masse des Top-Quarks aus radiativen Korrekturen. Diese Resultate beruhen noch auf einer relativ geringen Datenmenge, insbesondere für die e^-p Streuung. Die mit HERA II aufgenommenen Daten in polarisierter $e^\pm p$ Streuung (NC und CC) werden es erlauben, diese Messungen noch wesentlich genauer durchzuführen.

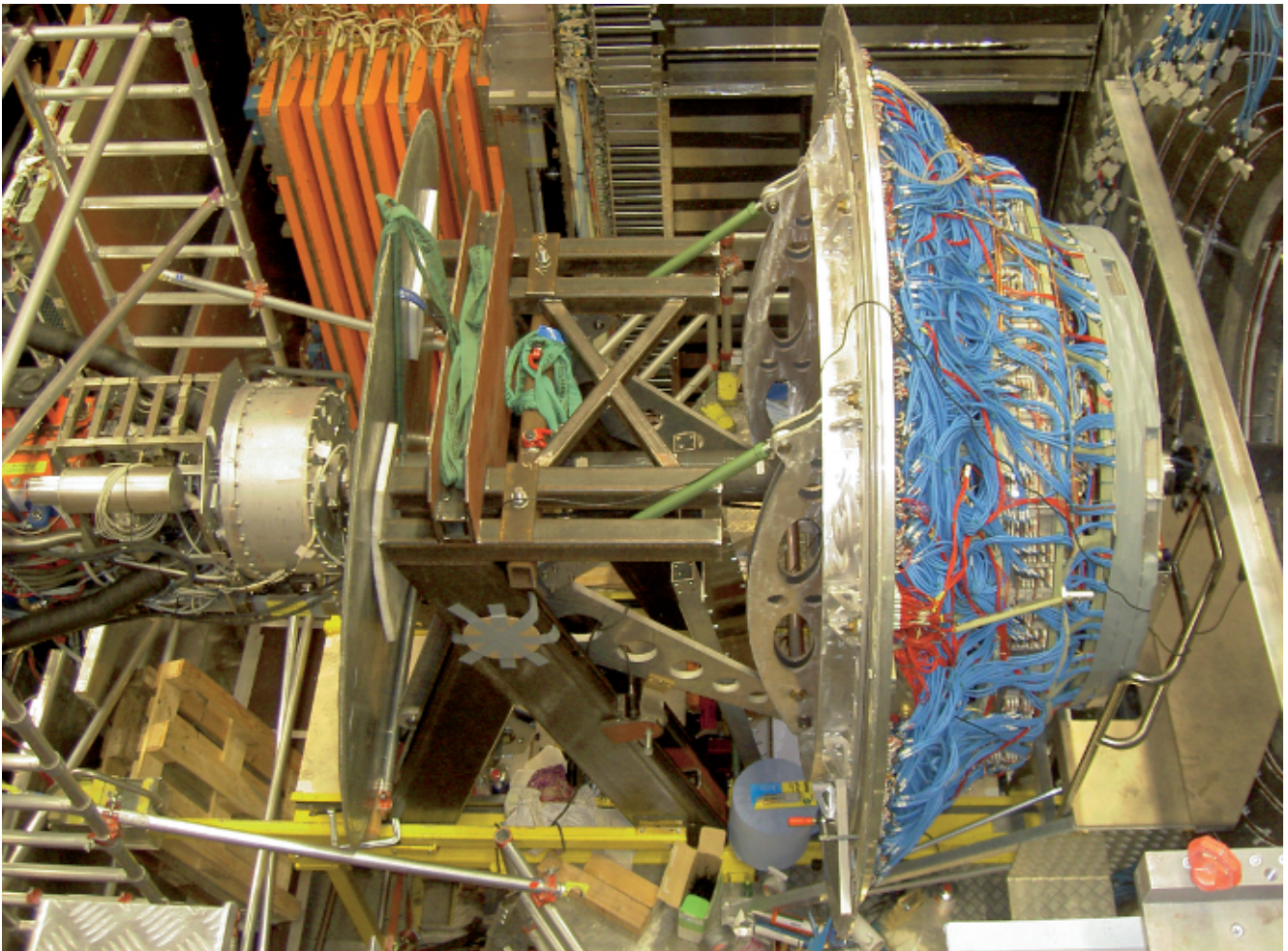


Abbildung 21: Der geöffnete ZEUS-Detektor. Der gesamte Vorwärtsdetektor ist über das Strahlrohr nach vorne herausgezogen.

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, 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, FZJ Jülich, Chonnam Nat. Univ. Kwangju, 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, Yale Univ. New Haven, York Univ. North York, Oxford Univ., Univ. und INFN Padova, Weizmann Inst. Rehovot, Univ. La Sapienza und INFN Roma, Polytech. Univ. Sagamihara, Univ. of California Santa Cruz, Ewha Womans Univ. Seoul, 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.

Specher: R. Yoshida, Argonne Natl. Lab., USA

Das Jahr 2005 war sowohl für HERA als auch ZEUS das bisher erfolgreichste. Von Anfang Januar bis Mitte November wurde HERA mit Elektronen betrieben und hat eine integrierte Luminosität von etwa 200 pb^{-1} geliefert von denen ZEUS etwa 150 pb^{-1} aufgezeichnet hat. Damit hat ZEUS in einem Jahr mehr Daten aufgezeichnet als in der gesamten Zeit vor dem Luminositätsupgrade. Ab etwa Ende Februar war das Vakuum in der Wechselwirkungszone Nord so weit konditioniert, dass HERA keine Beschränkungen des Strahlstromes mehr beachten musste. In der Folge wurde HERA regelmäßig mit Strömen von etwa 90 mA Protonen und 40 mA Elektronen betrieben. Die spezifische Luminosität lag mit mehr als $2 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ deutlich über den Designwerten.

Die Einstellung der Polarisation des Elektronenstrahls erwies sich als schwieriger als erwartet. Es gelang erst im Sommer nach langen und intensiven Studien regelmäßige Polarisationswerte von mehr als 35% zu erreichen.

Ab Mitte November begann eine etwa 3-monatige Betriebsunterbrechung, die bei ZEUS hauptsächlich zur Verbesserung der Kühlung im Bereich des Vorwärtsdetektors benutzt wurde. Daneben wurden Reparatur- und Wartungsarbeiten an verschiedenen Komponenten des Detektors vorgenommen.

Im Berichtsjahr hat die ZEUS Kollaboration neun Analysen mit Daten veröffentlicht, die bis zum Jahr 2000 genommen wurden. Im Zentrum des Interesses stehen aber immer mehr die Daten, die seit 2003 genommen wurden. Das Verständnis des Mikrovertexdetektors und der Daten mit polarisierten Leptonen ist inzwischen soweit fortgeschritten, dass ZEUS im Sommer fünf Analysen mit Daten von HERA II auf den großen Konferenzen vorgestellt hat. Einige dieser Analysen werden in diesem Bericht vorgestellt. Anfang 2006 ist mit der ersten Publikation von Wirkungsquerschnitten mit polarisierten Leptonen zu rechnen.

ZEUS Betrieb

HERA lieferte von Anfang Januar bis Mitte November regelmäßig Luminosität mit Elektronen. Da in der Wartungsperiode im Herbst des Jahres 2004 Arbeiten an der Wechselwirkungszone von H1 vorgenommen worden waren, dauerte es bis Ende Februar bis das Vakuum dort soweit konditioniert war, dass HERA ohne Beschränkung des Strahlstromes betrieben werden konnte. Von da an wurde HERA routinemäßig mit etwa 40 mA Elektronen und 90 mA Protonen gefüllt. Eine weitere Steigerung des Elektronstromes, obwohl im Prinzip möglich, führte zu häufigen Ausfällen verschiedener Komponenten und wurde im Interesse eines effizienten Betriebes nach einigen Versuchen aufgegeben. Die spezifische Luminosität lag mit mehr als $2 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ deutlich über den Designwerten. Damit konnte HERA häufig mehr als 1 pb^{-1} pro Tag liefern. An den besten Tagen hat ZEUS mehr als 1 pb^{-1} pro Tag aufgezeichnet, dies sind die höchsten Luminositäten in der Geschichte von HERA.

Die Untergrundbedingungen waren im ersten Drittel der Runperiode sehr wechselnd und durch häufige Spitzen im Protonuntergrund dominiert. Nach einigen Untersuchungen gelang es, einen Protodipol nahe der ZEUS Wechselwirkungszone als Auslöser der Spitzen zu identifizieren. Dieser Magnettyp war schon vorher an anderen Stellen durch undichte innere Kühlleitungen aufgefallen. Nach dem Wechsel der beiden Spulen dieses Magneten verbesserten sich die Untergrundbedingungen bei ZEUS signifikant. Bis zum Ende der Runperiode gab es keine weiteren Ausfälle dieses Magnettyps. In der folgenden Wartungsperiode wurden, wie bereits seit längerem geplant, alle Spulen dieses Typs ausgetauscht.

Die Einstellung der Polarisierung der Elektronen erwies sich als unerwartet schwierig. Beim Positronbetrieb im Jahr 2004 waren nach relativ kurzer Zeit Polarisierungen von 40% erreicht worden. Mit Elektronen waren zunächst Polarisationswerte von kaum 30% zu erreichen. Zur Untergrund- und Luminositäts-

messung wird HERA auch immer mit einigen nicht kollidierenden Strahlpaketen gefüllt. Die nicht kollidierenden Elektronen zeigten die erwartete deutlich höhere Polarisierung. Dies wies auf starke depolarisierende Strahl-Strahleffekte hin. Der Versuch HERA an einem anderem Arbeitspunkt mit deutlich veränderten Tunewerten zu betreiben, wurde nach wenigen Wochen wieder aufgegeben, da die Polarisierung zwar auf Werte um 40% erhöht werden konnte, dies aber mit einer um über 20% geringeren Luminosität erkauft wurde. Durch langwieriges und aufwändiges Adjustieren aller Parameter ist es schließlich gelungen regelmäßig Polarisationswerte von etwa 35% zu erreichen.

Mitte November begann die letzte große Wartungsperiode von HERA. Das Hauptziel für ZEUS war die Verbesserung der Kühlung im Bereich des Vorwärtsdetektors. Im Berichtsjahr konnte der Straw-Tube-Tracker des Vorwärtsdetektors nicht eingeschaltet werden, da mangelnde Kühlung einen zuverlässigen Betrieb des benachbarten supraleitenden Solenoiden unmöglich gemacht hat. Wichtigste Nebenbedingung dieser Reparatur war, dass das Strahlvakuum nicht gebrochen werden sollte. Deshalb wurde der gesamte Vorwärtsdetektor bei eingebautem Strahlrohr entlang des Strahls über den letzten HERA Magneten gezogen, um Zugang zum Solenoiden zu bekommen. Der äußere Tank des Solenoiden wurde im Bereich des Vorwärtsdetektors mit einer Wasserkühlung versehen. Außerdem wurden im Vorwärtsbereich die Schrauben ersetzt, die den äußeren Vakuumtank des Solenoiden zusammenhalten. Tests nach dem Zusammenbau des Detektors zeigten, dass Solenoid und Vorwärtsdetektor jetzt problemlos zusammen betrieben werden können. Daneben wurden an vielen Detektorcomponenten Reparatur- und Wartungsarbeiten vorgenommen. Ziel war dabei den Detektor so vorzubereiten, dass er in der letzten Betriebsperiode Daten mit höchster Qualität aufzeichnen kann. Diese Betriebsperiode ist mit 16 Monaten außergewöhnlich lang und es kann erwartet werden, dass der bei weitem größte Teil aller HERA Daten während dieser Zeit geliefert werden wird.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde HERA erstmals seit langer Zeit wieder mit Elektronen betrieben. Dabei wurde schnell eine Datenmenge erreicht, die die Größe des bisherigen e^-p -Datensatzes aus den Jahren 1998/99 bei weitem übertrifft. Dank der guten Leistung der Maschine wurde mit mehr als 140 Millionen Ereignissen der bislang umfangreichste Datensatz eines einzelnen Jahres aufgezeichnet. Neben der gesteigerten Luminosität bieten sich der Physikanalyse im HERA II-Run fundamental neue Möglichkeiten. Dazu gehört vor allem die Nutzung der Polarisierung der Elektron- und Positronstrahlen für das Studium der elektroschwachen Kopplung. Weiter sind die erheblichen Erweiterungen des Spurdetektorsystems bei ZEUS für die Physik mit schweren Quarks von großer Bedeutung. Darüberhinaus erreichen auch etliche Analysen der HERA I-Daten nun ihren optimalen Reifegrad und demonstrieren die einzigartige Reichweite des HERA-Programms.

Spinstruktur der schwachen Wechselwirkung

Die Spin-Struktur der Kopplung des geladenen schwachen Stroms (oft bezeichnet mit CC, für *charged current*) gehört zu den Eckpfeilern der von Glashow, Salam und Weinberg entwickelten Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung. Bei einer $e^\pm p$ -Wechselwirkung spricht man von einem geladenen Strom, wenn das Elektron oder Positron ein geladenes W-Boson abstrahlt, welches seinerseits mit einem Quark des Protons wechselwirkt, dabei geht das Lepton selbst in ein Neutrino- oder Antineutrino über. Dieser Prozess ist im Kern eine Umkehrung des Beta-Zerfalls unter kontrollierten Bedingungen. Dabei spielt die Spinorientierung des Leptons eine große Rolle, man spricht von rechtshändigen oder linkshändigen Teilchen je nachdem ob der Spin in Bewegungsrichtung oder entgegengesetzt zeigt. Das Standardmodell sagt voraus, dass nur linkshändige Elektronen und rechtshändige Positronen an ein W-Boson koppeln können.

Da HERA II über die einzigartige Möglichkeit verfügt, polarisierte Elektronen- und Positronenstrahlen mit

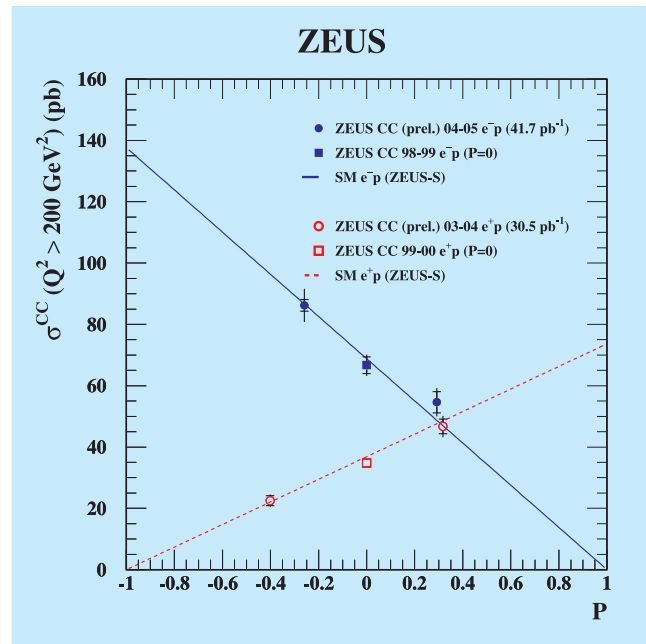


Abbildung 22: Totaler Wirkungsquerschnitt für Wechselwirkungen des geladenen Stroms in der tiefinelastischen e^-p -Streuung in Abhängigkeit vom mittleren Polarisationsgrad der Elektronen (gefüllte Symbole), im Vergleich mit der Vorhersage der elektroschwachen Theorie (durchgezogene Linie). Auch die entsprechende Messung für e^+p -Streuung ist gezeigt (offene Symbole, gestrichelte Linie).

Protonen zur Kollision zu bringen, kann diese elementare Eigenschaft des Standardmodells direkt überprüft werden. Nach der Messung mit polarisierten Positronen konnte im Berichtszeitraum nun auch der CC-Wirkungsquerschnitt für polarisierte Elektronen gemessen werden, wobei Polarisationsgrade von $+29\%$ und -26% erreicht wurden. Zusätzlich verwendet man auch die bei HERA I gemachten Messungen mit unpolarisierten Leptonen ($P = 0$). Ein vorläufiges Ergebnis ist in Abbildung 22 dargestellt. Sie zeigt den CC-Wirkungsquerschnitt für e^-p -Streuung (gefüllte Symbole). In der Extrapolation ist deutlich zu erkennen, dass der Wirkungsquerschnitt für linkshändige Elektronen ($P = -1$) maximal ist, während er für rechtshändige Elektronen ($P = +1$) im Rahmen der Genauigkeit verschwindet. Die entsprechende Messung für Positronen aus dem Run 2003/04 ist zum Vergleich ebenfalls

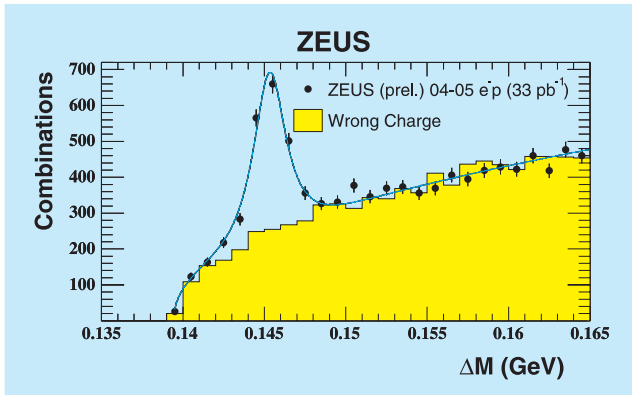


Abbildung 23: Invariantes Massenspektrum der $D^0\pi^+$ -Kandidaten relativ zur rekonstruierten D^0 -Masse in den HERA II e^-p -Daten (durchgezogene Linie). Die schattierte Fläche entspricht der Abschätzung des kombinatorischen Untergrundes unter Verwendung von Ladungskombinationen, die nicht zum Zerfall passen.

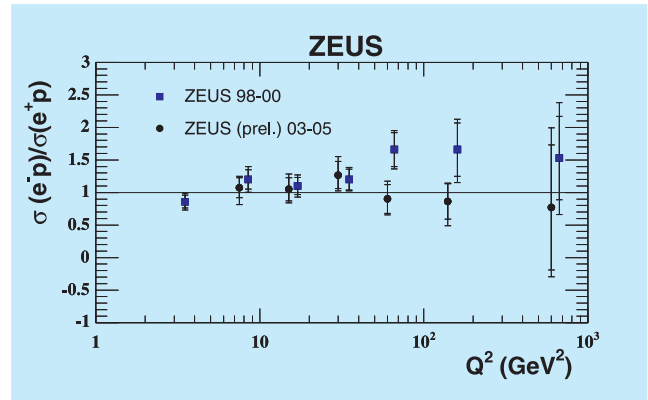


Abbildung 24: Verhältnis der D^* Produktionswirkungsquerschnitte in der tiefinelastischen e^-p - und e^+p -Streuung. Die gefüllten Kreise zeigen das vorläufige Ergebnis aus den HERA II-Daten, die gefüllten Rechtecke das frühere Resultat aus der HERA I-Periode.

gezeigt, sie weist wie in der Theorie erwartet den umgekehrten Trend auf, das Standardmodell wird also in eindrucksvoller Weise bestätigt. Mit der laufenden Datennahme wird die statistische Genauigkeit dieser Messung weiter verbessert werden, so dass auch gezielt nach subtileren Abweichungen vom Standardmodell gesucht werden kann.

Charm-Production in den HERA II-Daten

Charm-Production macht bei hohen Werten des Impulsübertrags Q^2 bis zu 30% des totalen Wirkungsquerschnitts aus. Nach unserem heutigen Verständnis wird Charm in ep -Kollisionen hauptsächlich durch den Boson-Gluon-Fusionsmechanismus erzeugt, ein Prozess dessen Häufigkeit nicht von der Ladung des Leptons abhängt. Dennoch schien in einer früheren ZEUS-Messung die Rate von $D^*(2010)^+$ -Mesonen, welche eine klassische Manifestation von Charm darstellen, in Elektron-induzierten Ereignissen systematisch höher zu sein, und zwar um bis zu zwei Drittel bei hohen Q^2 . Allerdings war der mit HERA I genommene e^-p -Datensatz zu klein, um das Vorhandensein einer echten Anomalie zu erhärten oder zu widerlegen. Die-

ser offenen Frage aus HERA I-Zeiten konnte nun mit den neuen Elektron-Daten nachgegangen werden.

Bereits mit den ersten 33 pb^{-1} der HERA II e^-p -Daten stand im Vergleich mit der alten Messung ein rund doppelt so großer Datensatz zur Verfügung. Das unter Verwendung des Vertexdetektors bestimmte invariante Massenspektrum (Abbildung 23) zeigt ein klares Signal der D^* -Resonanz, aus dem sich die Produktionsrate zuverlässig bestimmen lässt. Abbildung 24 zeigt das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte $\sigma(e^-p)/\sigma(e^+p)$ für die D^* -Produktion sowohl für die alte als auch für die neue Messung. Man sieht, dass die auf deutlich mehr Statistik beruhende HERA II-Messung sehr gut mit einem einheitlichen Produktionsmechanismus verträglich ist. Die frühere Anomalie ist daher als statistische Fluktuation einzustufen.

Die Handschrift der QCD: Multijets

Im Jahre 1979 wurde in e^+e^- -induzierten Drei-Jet-Ereignissen bei DESY am Speicherring PETRA das Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung, das Gluon, erstmals direkt nachgewiesen und damit ein wesentlicher Grundstein zur experimentellen Etablierung

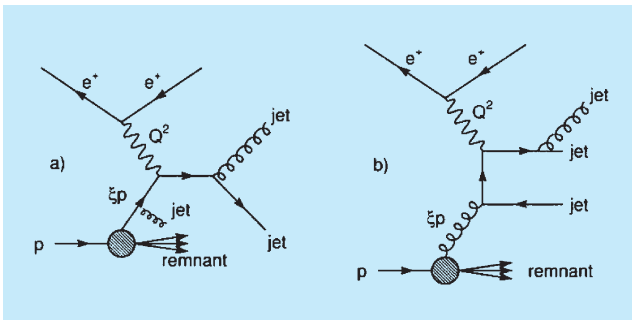


Abbildung 25: Feynmandiagramme zweier Elementarprozesse, die zur Produktion von Endzuständen mit drei Jets führen.

der Quantenchromodynamik (QCD) gelegt. Ein modernes HERA-Äquivalent dieser historischen Messung ist die Beobachtung von Multijet-Ereignissen, bei denen neben dem Jet des gestreuten Partons ein oder mehrere weitere Jets beobachtet werden. In beiden Fällen sieht man die QCD gewissermaßen direkt bei der Arbeit, in Kontrast zu ihrem subtileren Wirken in der Skalenbrechung der Strukturfunktionen.

Die starke Wechselwirkung erlaubt es nicht, einzelne Quarks oder Gluonen aus ihren Hadronen vollständig herauszulösen und frei zu beobachten. Stattdessen entsteht beim Herausschlagen eines Partons aus dem Proton ein ganzer Schauer neuer Teilchen, den man als Jet bezeichnet. In ihren Eigenschaften spiegeln Jets jedoch die Richtung und Energie der originären Partonen wider, und erlauben daher die Rekonstruktion der elementaren Wechselwirkung auf Parton-Niveau.

Bei der tiefunelastischen Elektron-Proton-Streuung entsteht neben den Überresten des Protons im gewöhnlichen Fall nur ein Jet, der vom gestreuten Quark herrührt. Komplexere Endzustände mit zwei Jets sind durch Boson-Gluon-Fusionsprozesse oder durch die QCD-Version des Comptoneffekt denkbar, drei Jets können durch Abstrahlung eines weiteren harten Gluons entstehen, wie in Abbildung 25 gezeigt. Da diese Dijet- und Trijet-Prozesse in der Störungstheorie unterschiedlichen Ordnungen der starken Kopplungskonstanten entsprechen, lassen sich hierbei die entsprechenden Matrixelemente der elektroschwachen und starken Wechselwirkung direkt testen. Darüber hin-

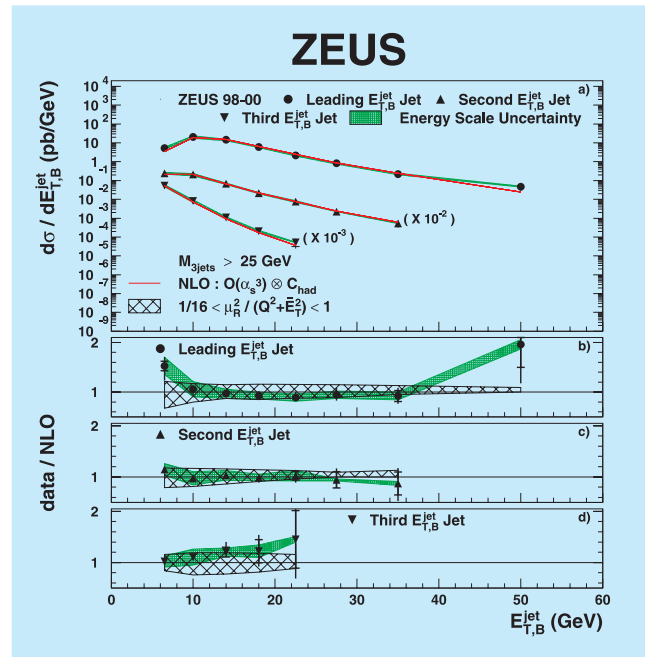


Abbildung 26: Inklusiver Wirkungsquerschnitt der Trijet-Produktion als Funktion der transversalen Energien der Jets (a), im Vergleich mit der Modellvorhersage (b–d).

aus kann aus dem Verhältnis der Jetraten α_s selbst mit relativ geringen Unsicherheiten bestimmt werden.

Der differentielle Wirkungsquerschnitt der Trijet-Produktion ist in Abbildung 26 gezeigt. Die drei Jets sind hierbei absteigend nach ihrer transversalen Energie geordnet, was den Abfall der Raten zu kleinen E_T für die ersten beiden Jets erklärt. Die Vorhersagen der QCD in der Ordnung α_s^3 liefern eine recht gute Beschreibung der Daten.

In Abbildung 27 ist die relative Rate der Trijet- zur Dijet-Produktion gezeigt, die mit Q^2 abnimmt. Dieser Abfall spiegelt die Skalenabhängigkeit der starken Kopplungskonstante wider, auf die wir im übernächsten Abschnitt noch einmal zurückkommen werden. Die überlagerten Modellkurven für verschiedene Werte von $\alpha_s(M_Z)$ zeigen sehr deutlich, wie eine stärkere Kopplung auch zu einer höheren Rate von Trijet-Ereignissen führt.

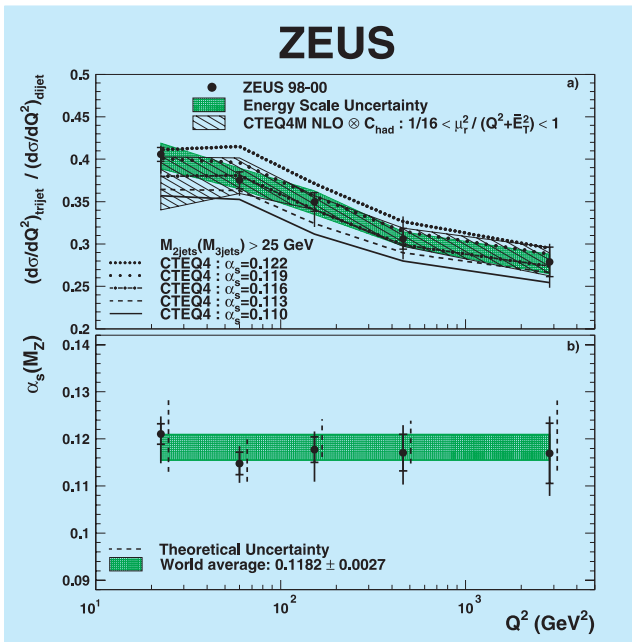


Abbildung 27: (a) Verhältnis der Wirkungsquerschnitte von Trijet- zu Dijet-Produktion, im Vergleich mit Modellvorhersagen zu verschiedenen Werten von $\alpha_s(M_Z)$. (b) Extraktion der starken Kopplungskonstanten (bezogen auf die Skala M_Z) aus jedem Datenpunkt.

QCD-Analyse der Wirkungsquerschnitte von inklusiven und Jet-Daten

Ein fundamentales Ziel des HERA-Forschungsprogramms ist die präzise Vermessung der Struktur des Protons, welches nach unseren heutigen Erkenntnissen aus einem dynamischen Bindungszustand von Quarks und Gluonen aufgebaut ist. Im Quark-Parton-Modell werden die Quantenzahlen des Protons vor allem durch seine drei Valenzquarks, zwei u-Quarks und ein d-Quark, bestimmt, die den überwiegenden Teil seines Impulses tragen. Neben den Valenzquarks spielen aber auch Gluonen, die Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung, sowie ein See aus weiteren Quarks und Antiquarks eine wichtige Rolle, die im dynamischen Gleichgewicht des Bindungszustands des Protons laufend neu erzeugt und wieder absorbiert werden. Die Valenzquarks und See-Quarks im Proton nehmen direkt an der elektroschwachen Wechselwirkung teil,

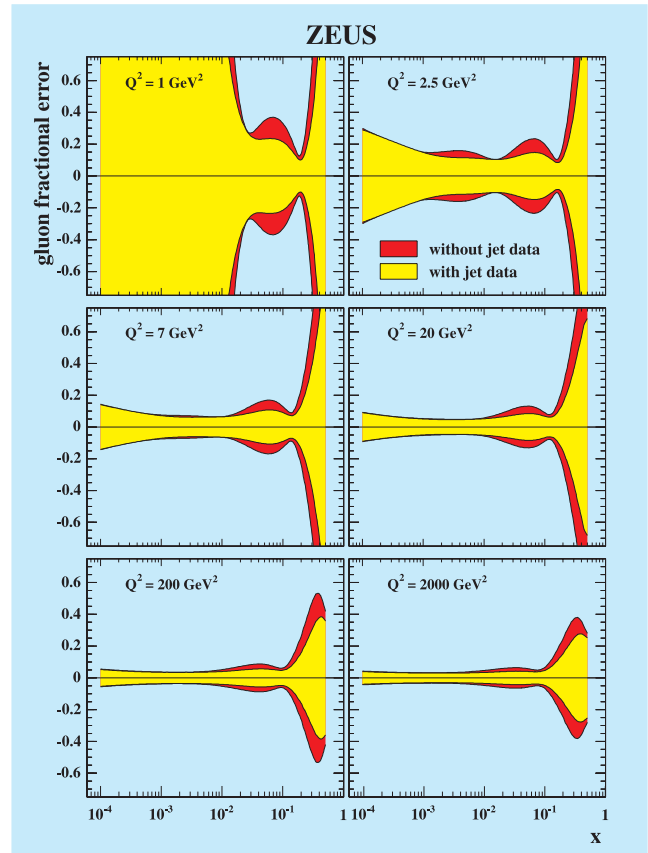


Abbildung 28: Experimentelle Unsicherheit der Bestimmung der Gluon-Verteilung für verschiedene Werte von Q^2 . Die erhebliche Verbesserung der Genauigkeit durch Einbeziehung der Jet-Ereignisse (hell) gegenüber rein inklusiven Messungen (dunkel) ist vor allem bei mittleren und hohen x -Werten offensichtlich.

so dass ihre Verteilungsfunktionen in inklusiven tiefunelastischen Streuprozessen (DIS) unmittelbar gemessen werden können. Die Gluonen im Proton sind dagegen wesentlich schwerer aufzuspüren, denn sie tragen nur indirekt zu diesen Streuprozessen bei. Es war daher bislang üblich, HERA-Daten mit Resultaten anderer Experimente, etwa Messungen der Jet-Produktion am Tevatron des Fermilab, zu kombinieren, um ein vollständiges Bild zu erhalten. Diese Daten sind jedoch zum Teil mit erheblichen systematischen Unsicherheiten behaftet, die die Kombination erschweren. Das Ziel ist daher, all diese Strukturfunktionen in einem einzigen Experiment zu bestimmen. Das ZEUS-Experiment

hat daher eine simultane Analyse sowohl inklusiver DIS als auch Jet-Daten durchgeführt, die die genannten Probleme vermeidet. Die Wirkungsquerschnitte der Jet-Produktion sind sensitiv auf die Gluon-Verteilung im mittleren und höheren x -Bereich, wie in Abbildung 28 dargestellt, so dass alle Partonverteilungen durch einen einzigen simultanen Fit bestimmt werden können. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt, wobei sich die Charakteristika der relativ harten Valenzquarkverteilungen, xu_v und xd_v , klar von den weicheren Verteilungen der Gluonen (xg) und See-Quarks (xS) abheben.

Da die Produktion von Jets bei hohen Impulsüberträgen durch den QCD-Compton-Prozess dominiert ist, kann unter Einbeziehung der Jet-Daten auch die starke Kopplungskonstante α_s bestimmt werden. In Abbildung 30 ist die charakteristische Variable für die Qualität des Fits, χ^2 , gezeigt, wobei der Ort des χ^2 -Minimums den

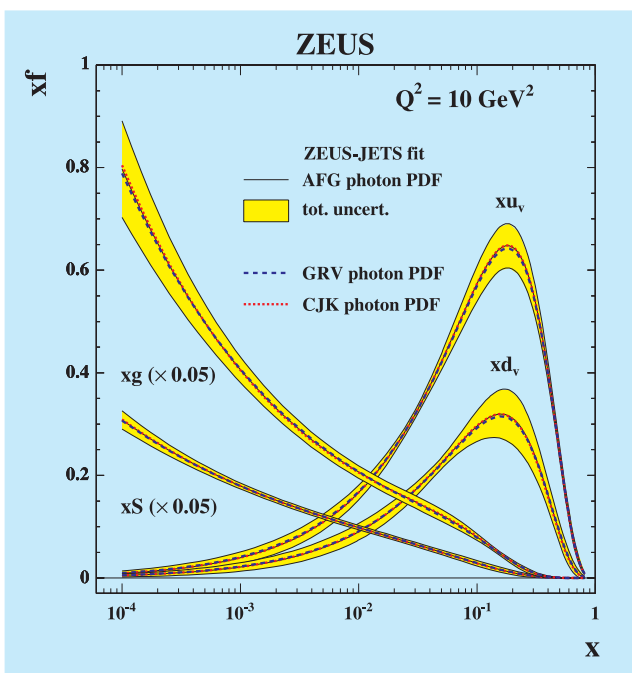


Abbildung 29: Parton-Verteilungen für die u- und d-Valenzquarks des Protons, sowie für Gluonen und See-Quarks. Die verschiedenen Linien innerhalb des schattierten Bereichs stellen die Resultate mit unterschiedlichen Modellen für die Strukturfunktion des Photons dar.

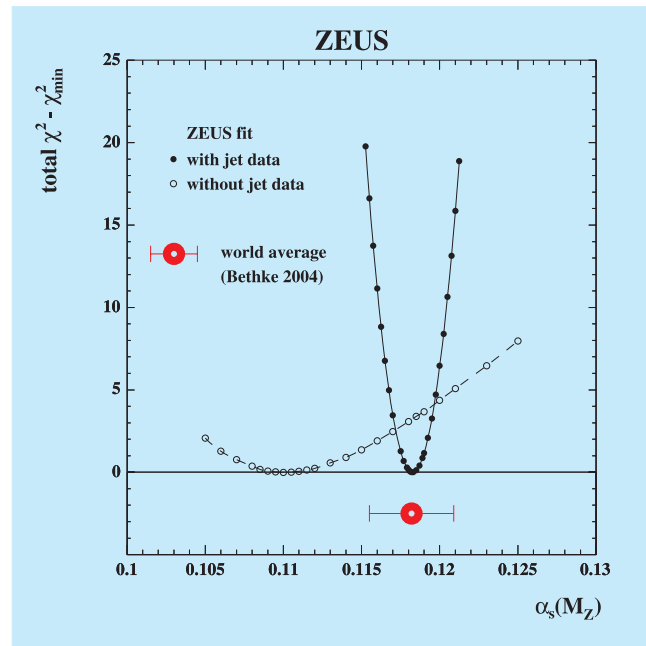


Abbildung 30: χ^2 -Profil als Funktion der starken Kopplungskonstanten α_s für den Fit mit und ohne Einbeziehung der Jet-Daten.

bevorzugten Wert von α_s anzeigt, und die Breite ein Maß für die experimentelle Unsicherheit ist. Man sieht, dass sich die Genauigkeit der α_s -Bestimmung durch die Einbeziehung der Jet-Daten entscheidend verbessert, darüber hinaus stimmt der resultierende Wert von $\alpha_s = 0.1183$ sehr gut mit dem Weltmittelwert überein.

Asymptotische Freiheit und Confinement

Ein herausragendes Charakteristikum der Quantenchromodynamik ist das Verhalten bei verschiedenen Skalen, das vom Confinement der Quarks bei kleinen Impulsüberträgen (und demnach großen Abständen) zur asymptotischen Freiheit bei hohen Impulsüberträgen (und kleinen Abständen) reicht. Für die Entdeckung dieses Prinzips erhielten Gross, Politzer und Wilczek im Jahre 2004 den Nobelpreis für Physik.

Für den experimentellen Nachweis des Skalenverlaufs der starken Kopplungskonstanten mussten in der Vergangenheit α_s -Messungen sehr unterschiedlicher Experimente kombiniert werden, was aufgrund

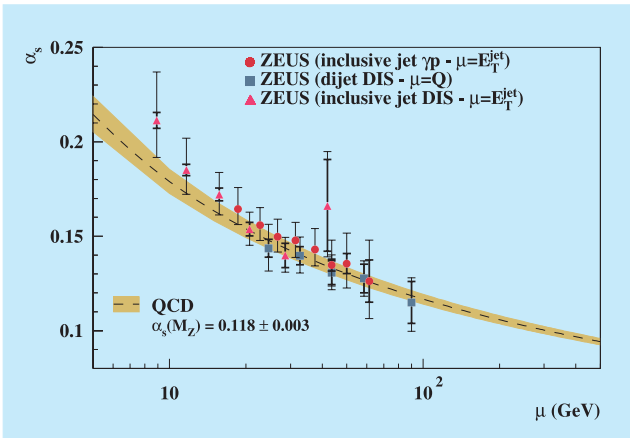


Abbildung 31: Q^2 -Abhängigkeit der starken Kopplungskonstanten, unter ausschließlicher Verwendung von ZEUS-Messungen bei HERA.

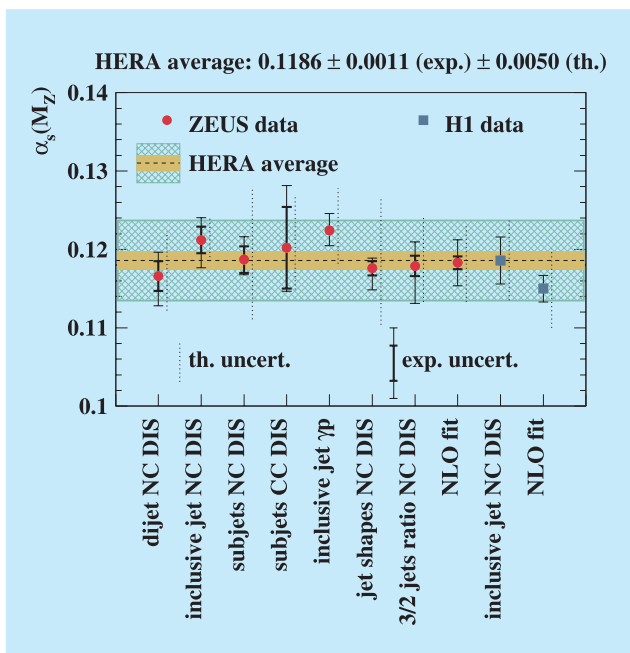


Abbildung 32: Übersicht von Messungen der starken Kopplungskonstanten aus Jets und QCD-Fits bei HERA.

der unterschiedlichen Systematik der Experimente mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Inzwischen ermöglicht jedoch die Vielfalt der Messmethoden bei HERA, den Verlauf der starken Kopplungskonstanten in einem einzigen Experiment zu bestimmen. Abbil-

dung 31 zeigt dies unter ausschließlicher Verwendung von Messungen der ZEUS-Kollaboration.

Die Resultate der bisherigen Abschnitte fügen sich nahtlos in eine umfassende Vermessung der starken Kopplungskonstanten ein. Eine Übersicht von α_s -Messungen bei HERA, bezogen auf die Skala der Z-Masse, ist in Abbildung 32 gezeigt. Die Konsistenz der Messungen aufgrund sehr verschiedener Methoden zeigt eindrucksvoll den Grad des erreichten theoretischen Verständnisses der Dynamik der starken Wechselwirkung, und die Ausgereiftheit der experimentellen Bestimmung.

Die Rolle der Diffraktion bei hohen Q^2

Zu den überraschenden Entdeckungen des bisherigen HERA-Programms gehört die signifikante Rolle diffraktiver Prozesse in der ep-Streuung. In einem substantiellen Teil der Wechselwirkungen wird das Proton offenbar nicht durch Herausschlagen eines seiner Partonen zerstört, sondern es bleibt intakt und nimmt lediglich durch Emission effektiv farbloser Austauschpartonen an der Wechselwirkung teil. Diese Prozesse erkennt man experimentell an der Menge deponierter Energie in unmittelbarer Nachbarschaft zum auslaufenden Protonenstrahl: während bei normalen tiefunelastischen Streueignissen hier die Fragmente des Protons viel Energie deponieren, zeichnen sich diffraktive Wechselwirkungen durch eine markante Leere in diesem Bereich aus, die man als Rapiditätslücke bezeichnet. Im Berichtszeitraum veröffentlichte ZEUS ein umfangreiches Papier, das die detaillierte Vermessung dieser Art von Wechselwirkung zusammenfasst.

Neben wesentlichen Aspekten für das Verständnis der starken Wechselwirkung kann Diffraktion aber auch ein idealer Mechanismus zur untergrundfreien Produktion schwerer Teilchen sein; beispielsweise hat man bei ZEUS hochreine Proben von Quarkonia wie Φ und J/Ψ studiert, in denen, bedingt durch die diffraktive Erzeugung, praktisch keine sekundären Reaktionsprodukte die Analyse stören. Für diese Art der Produktion interessiert man sich auch im Hinblick auf den am CERN in Genf im Bau befindlichen Large Hadron Collider

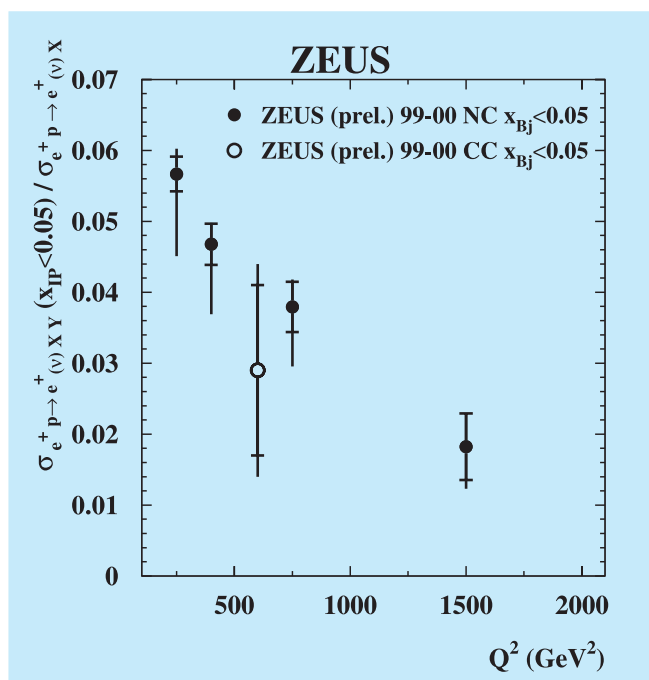


Abbildung 33: *Relativer Beitrag von Ereignissen mit großer Rapiditätslücke zum inklusiven DIS-Wirkungsquerschnitt als Funktion von Q^2 , sowohl für den neutralen (gefüllte Kreise) als auch für den geladenen Strom (offener Kreis).*

(LHC), denn in gewöhnlicher inklusiver Produktion müssen Signaturen z. B. des Higgs-Teilchens mit einer sehr großen Zahl von Reaktionsbeiprodukten konkurrieren. Diffraktive Endzustände dagegen könnten erheblich leichter zu analysieren sein, sofern sie bei diesen hohen Energien und Impulsüberträgen noch auftreten.

Es ist daher sehr wichtig zu untersuchen, ob es sich bei der Diffraktion möglicherweise um einen *Higher Twist*-Effekt handelt, der bei höheren Impulsüberträgen schnell ausstirbt. Bei ZEUS hat man in einer vorläufigen Studie den Anteil von Ereignissen mit diffraktiver Signatur in der tiefunelastischen Streuung mit geladenen und neutralen Strömen bei $Q^2 > 200 \text{ GeV}^2$ untersucht. Der resultierende Anteil diffraktiver Ereignisse am inklusiven DIS-Wirkungsquerschnitt (Abbildung 33) fällt zwar kontinuierlich mit wachsendem Q^2 , beträgt aber immer noch etwa 2% bei $Q^2 = 1500 \text{ GeV}^2$,

so dass diffraktive Signaturen auch bei hohen Impulsüberträgen immer noch mit hohen Raten erzeugt werden können und nicht „aussterben“. Darüber hinaus zeigt sich auch, dass die Wahrscheinlichkeit einer diffraktiven Anregung nicht davon abhängt, ob die Wechselwirkung durch einen geladenen oder neutralen Strom induziert wird.

Auf der Spur des Pentaquark-Rätsels

Die Bezeichnung Pentaquarks steht für hypothetische Hadronzustände die aus vier Quarks und einem Anti-quark gebildet werden. Eine Reihe von Experimenten, darunter auch ZEUS, hatten vor einiger Zeit Hinweise auf eine schmale Resonanz in der Region um 1530 MeV in den Zerfallskanälen nK^+ und pK_S^0 gefunden, die mit einem exotischen Pentaquark-Baryonzustand Θ^+ mit dem Quarkaufbau $uudd\bar{s}$ konsistent sein könnte. Eine umfassende endgültige Interpretation der vorliegenden Messungen steht jedoch noch aus.

Nach gängigen Modellvorstellungen ist das Θ^+ nur ein Zustand in einem Dekuplett von Pentaquarks mit Spin 1/2. Wenn diese Interpretation des Signals zuträfe, sollte man erwarten dass auch andere Mitglieder dieses Dekupletts nachgewiesen werden können. Insbesondere zwei Zustände doppelter Strangeness mit der Quarkstruktur $uuss\bar{d}$ und $ddss\bar{u}$, bezeichnet als $\Xi_{3/2}^+$ und $\Xi_{3/2}^-$ könnten vielversprechend sein, da das Experiment NA49 am CERN SPS vor gut einem Jahr von einem entsprechenden Signal bei einer Masse von 1862 MeV berichtet hat.

Das ZEUS-Experiment hat daher nach entsprechenden Signaturen in ep-Kollisionen gesucht. Diese exotischen Pentaquarks sollten im Zerfallskanal $\Xi^- \pi^\pm$ zu rekonstruieren sein, wobei Ξ^- ein seit langem bekanntes Baryon mit doppelter Strangeness ist, welches in $\Lambda \pi^-$ zerfällt. Wie in Abbildung 34 gezeigt, kann bei ZEUS ein sehr schmales und nahezu untergrundfreies Signal des Ξ^- -Baryons und seines Antiteilchens isoliert werden, hierbei wurde die Messung des spezifischen Energieverlusts zur Trennung von Pionen und Protonen ausgenutzt.

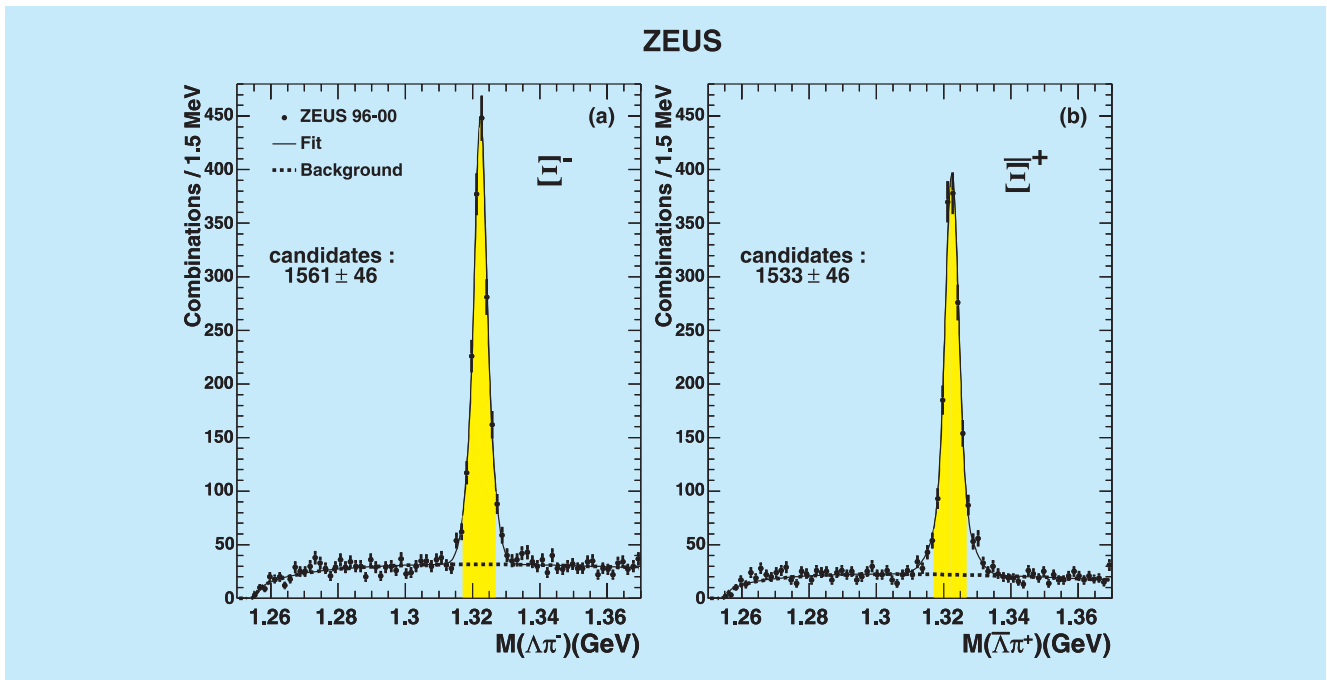


Abbildung 34: Rekonstruktion des Ξ^- und seines Antiteilchens in den $\Lambda\pi^-$ - und $\bar{\Lambda}\pi^+$ -Massenspektren.

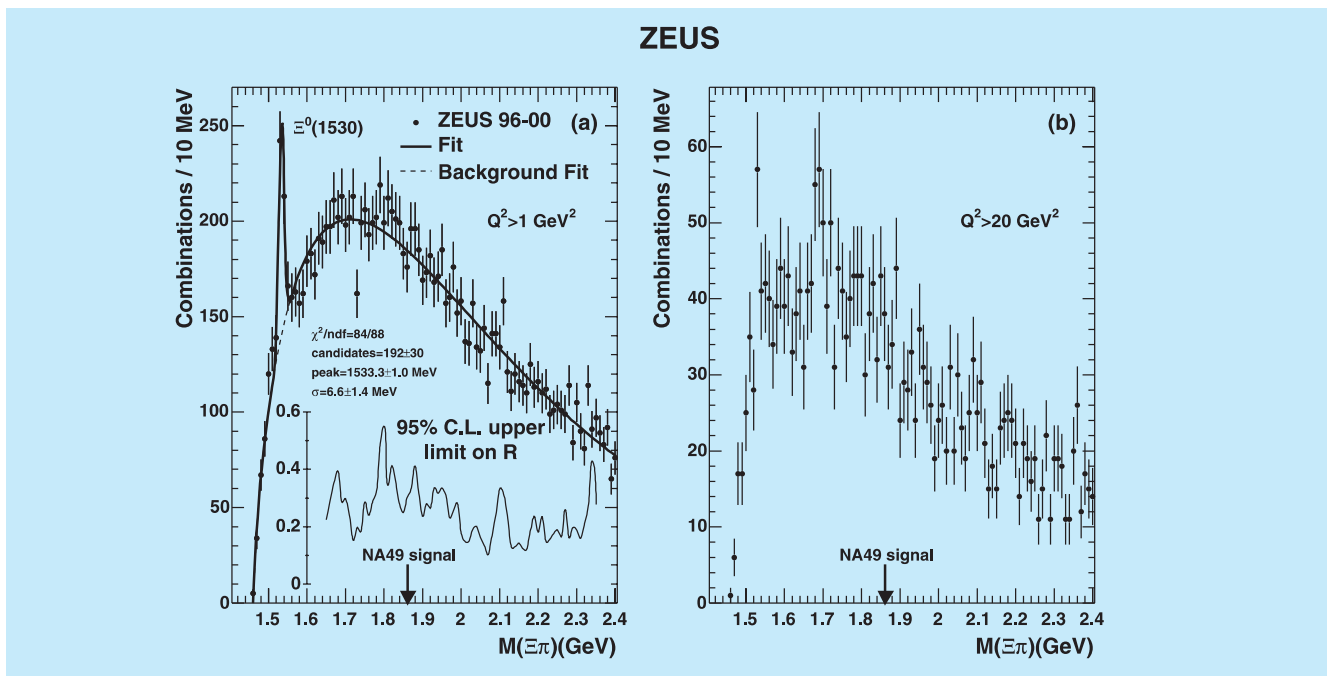


Abbildung 35: Spektren der invarianten Masse aller vier $\Xi^- \pi^\pm$ -Ladungskombinationen, links für $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$, rechts für $Q^2 > 20 \text{ GeV}^2$.

Kombiniert man diese Ξ -Kandidaten mit geladenen Pionen, so erhält man die in Abbildung 35 gezeigten Massenspektren. Man beobachtet einen scharfen Massenpeak oberhalb der Schwelle bei 1533 MeV, der mit der bekannten $\Xi^0(1530)$ Baryonresonanz identifiziert werden kann und das hohe Auflösungsvermögen des Experiments demonstriert. Die beobachtete Anzahl von $\Xi^0(1530)$ -Baryonen schließt auf eine vergleichbare Sensitivität der Experimente. Es ist jedoch kein Hinweis auf eine nicht identifizierte Resonanz zu finden, insbesondere gibt es in den ZEUS-Daten kein Signal im Massenbereich der NA49-Messung. Dies trifft auch für den Bereich höherer Q^2 zu, in dem bei ZEUS das Θ^+ Signal am stärksten ausgeprägt war. Im Bereich des NA49-Signals ergibt die ZEUS-Messung eine konservative Obergrenze von 29% relativ zur Produktionsrate des $\Xi^0(1530)$. Dies bedeutet allerdings keinen direkten Widerspruch zur NA49-Messung, da die Produktionsmechanismen in beiden Wechselwirkungstypen unterschiedlich sein können.

Für eine endgültige Klärung der Pentaquark-Frage wird daher die nächste Runde von Messungen abzuwarten sein. Bei ZEUS wird insbesondere die laufende

HERA II Datennahme die experimentelle Basis für Pentaquark-Studien erweitern.

Ausbildung

Entscheidende Beiträge sowohl zum Betrieb des Detektors wie zur Physikanalyse haben im Berichtsjahr 24 Diplomanden, 84 Doktoranden und 32 Nachwuchswissenschaftler (PostDocs) geleistet. Die DESY Gruppe des ZEUS Experiments hat dabei in enger Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg 11 Doktoranden betreut. Großen Zuspruch fand auch das Sommerstudenten-Programm des DESY, bei dem fortgeschrittene Studenten einige Wochen in den Forschungsgruppen mitarbeiten. Mit diesem Programm gelingt es häufig bei Studenten das Interesse an einer Diplom- oder Masterarbeit in der experimentellen Hochenergiephysik zu wecken. Auch Schüler arbeiten gelegentlich im Rahmen eines Praktikums für einige Zeit in der ZEUS-DESY Gruppe. Darüberhinaus kommt seit 10 Jahren regelmäßig ein Gymnasiallehrer, um für einige Zeit in den Sommerferien in der Gruppe mitzuarbeiten.

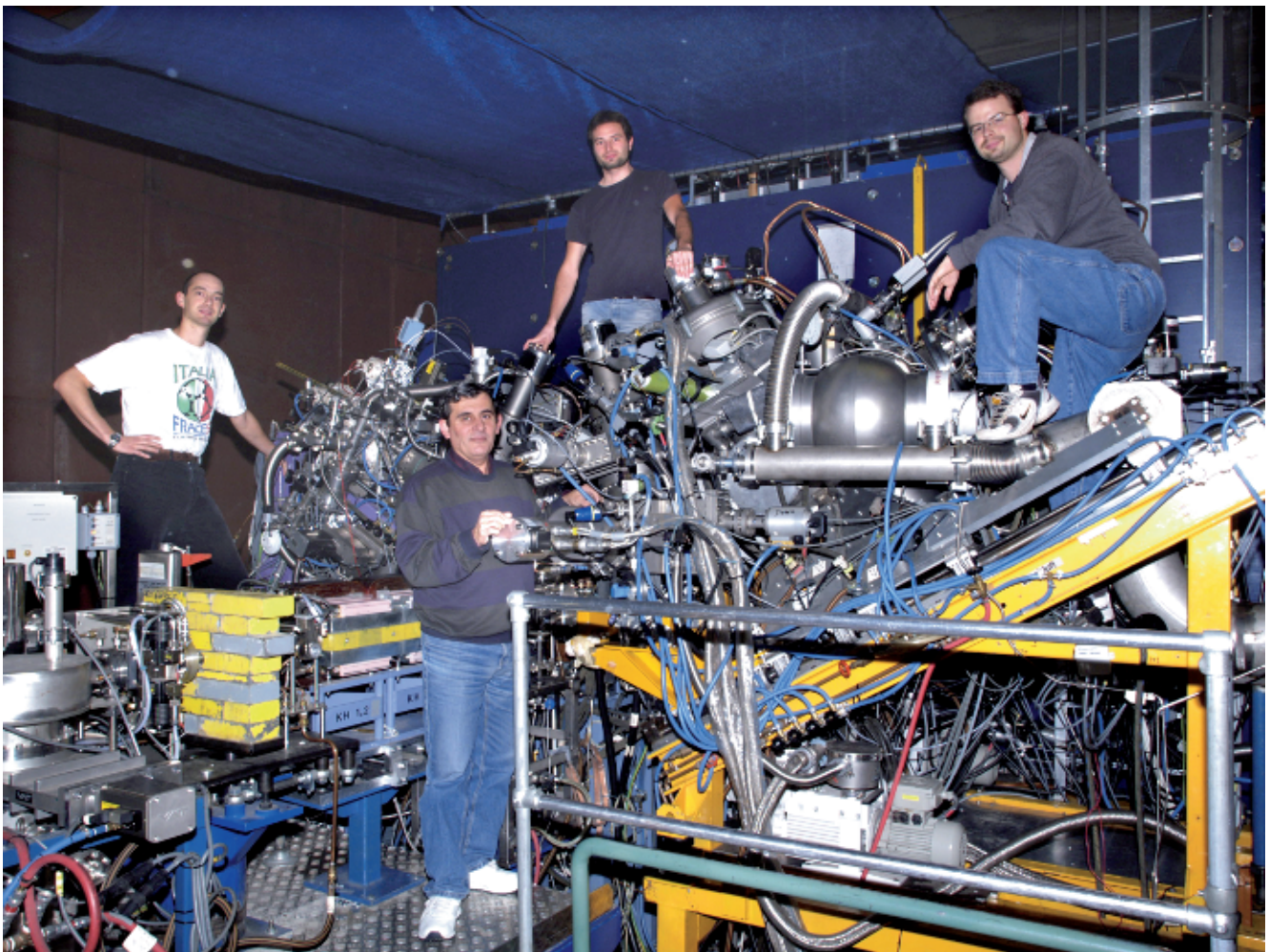


Abbildung 36: Vorbereitungen für den Ausbau des polarisierten HERMES-Targets im November 2005. Das Foto verdeutlicht den komplexen Aufbau des polarisierten Targets, positioniert links und rechts der Strahlröhren die am unteren linken Bildrand erkennbar sind.

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

Sprecherin: E.C. Aschenauer, DESY Zeuthen

Nach 10 Jahren erfolgreicher Laufzeit wurde im November 2005 das polarisierte HERMES-Target abgeschaltet und ausgebaut.

Damit schließt die in der Spinphysik bisher erfolgreichste Periode der Aufzeichnung von tiefinelastischen Streueignissen an longitudinal polarisierten Wasserstoff- und Deuteriumtargets sowie an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget ab.

Die Analyse dieser Daten führte zu einer Reihe einzigartiger Ergebnisse, die das bisher umfassendste Bild einer Beschreibung der Spinstruktur des Nukleons ergeben. Wie in vorangegangenen Beiträgen dargelegt, ermöglichten diese Daten erstmalig die direkte Bestimmung der Helizitätsverteilungen für fünf Quarksorten (Up, Down, Anti-Up, Anti-Down und Strange) sowie die Extraktion der Gluonpolarisation als Funktion des Transversalimpulses inklusiv erzeugter Hadronen.

In diesem Beitrag werden die finalen HERMES-Resultate der Messung der spinabhängigen Strukturfunktion g_1 des Protons, Deuterons und Neutrons vorgestellt. Die Deuteron-Daten stellen die derzeit weltweit genaueste Messung der Strukturfunktion g_1^d dar. Zudem wird der Einfluss dieser neuen HERMES-Daten auf die Ergebnisse von

QCD-Analysen auf Grundlage der Weltdaten für g_1 erörtert.

Mit dem Umbau des HERMES-Targets zur Erzeugung transversal polarisierten Wasserstoffs im Jahre 2001 begann ein neuer Abschnitt im Studium der Struktur des Nukleons. Erstmals wurden Größen gemessen die in direkter und eindeutiger Weise Informationen über die *Transversity*-Verteilung, die dritte – bislang unbekannte – der drei fundamentalen Quarkverteilungen, enthalten. Diese azimuthalen Wirkungsquerschnitts-Asymmetrien für Pionen wurden bereits in vorangegangenen Beiträgen vorgestellt. Die hier gezeigten vorläufigen Ergebnisse wurden aus den bis einschließlich 2004 aufgenommenen Daten extrahiert und bestätigen die bereits publizierten Asymmetrien mit höherer Genauigkeit. Ein bedeutendes Resultat ist zudem die erstmalige Messung der Asymmetry in der Ausrichtung von zwei produzierten Pionen. Diese ermöglicht eine komplementäre Bestimmung der *Transversity*-Verteilung. Im Jahr 2005 konnte der Datensatz tiefinelastischer Streueignisse an transversal polarisiertem Wasserstoff im Vergleich zum Zeitraum 2002–2004 mehr als verdoppelt werden.

Weitere Untersuchungen wurden an Daten von unpolarisierten schwereren Kernen durchgeführt.

Es wurde eine neue Observable gemessen, die die Untersuchung der Korrelation nuklearer Effekte zwischen Hadronen, die in derselben Wechselwirkung aber zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Orten innerhalb des Kerns erzeugt wurden, ermöglicht.

Das polarisierte Target

Einführung

Nach 10 Jahren ununterbrochener Laufzeit wurde das HERMES-Target für kernspinpolarisierten Wasserstoff bzw. Deuterium im November 2005 abgeschaltet.

Das HERMES-Experiment wurde 1990 vorgeschlagen und dahingehend entwickelt, dass es parallel mit den Kollisionsexperimenten H1 und ZEUS laufen kann, ohne die Lebenszeit des Elektronenstrahls (ungefähr 10 Stunden) signifikant zu reduzieren. Daher sind Festkörpertargets von vornherein ausgeschlossen und die Targetflächendichte auf ca. 10^{15} Wasserstoffatome pro cm^2 begrenzt. Eine Speicherzelle, welche von einer polarisierenden Atomstrahlquelle gespeist wird, wurde vorgeschlagen und realisiert. In der Speicherzelle, die sich im Vakuum des HERA-Elektronenstrahls befindet (internes Target), durchlaufen die Gasatome mehrere hundert Stöße mit der Zellwand bevor sie das Ende der Zelle erreichen und an den offenen Enden abgepumpt werden. Dadurch wird eine Targetdichte erreicht, die um ca. einen Faktor 100 höher ist als für freie Gastargets. Die Speicherzellentechnologie erlaubt somit das Erreichen hoher Targetdichten ohne Verwendung von starken Austrittsfenstern wie sie bei freien Gastargets, die unter hohem Druck stehen, nötig sind.

Die statistische Präzision eines Spin-Experiments ist gegeben durch *figure of merit* (F):

$$F = nIt(P_B P_T f)^2,$$

mit der Targetdichte n , dem Strahlstrom I und der Gesamtlaufzeit t . Der quadratische Faktor aus Beampolarisation P_B , Targetpolarisation P_T und Verdünnungsfaktor f ist die entscheidende Komponente für präzise

Messungen. Der Verdünnungsfaktor f , welcher die Anzahl nichtpolarisierbarer Nukleonen bezüglich der Gesamtzahl der Nukleonen im Target angibt, beschreibt den grundlegenden Unterschied zwischen Experimenten die Gastargets bzw. Festkörpertargets verwenden. Polarisierte Gastargets zeigen Verdünnungsfaktoren nahe $f^2 = 1$ (für Wasserstoff) während Festkörpertargets typische Werte von $f^2 = 0.02$ (z. B. für Butanol) aufweisen.

Die Vorteile der von HERMES verwendeten Technologie einer Speicherzelle bestehen darin, dass eine hohe Targetpolarisation und -dichte erreicht wird bei Verdünnungsfaktoren nahe 1. Eine Umpolung der Polarisation ist sehr schnell durchzuführen, was zu einer Minimierung systematischer Fehler aufgrund zeitabhängiger Detektoreffekte führt. Desweiteren ist nur mit dieser Technologie eine Tensorpolarisation P_{zz} für Deuterium möglich.

Während der Jahre 1996–1997 wurde longitudinal polarisierter Wasserstoff ($H_{||}$) erzeugt, gefolgt von longitudinal polarisiertem Deuterium 1998–2000 ($D_{||}$). In den Jahren 2002–2005 wurde erneut Wasserstoff, diesmal jedoch transversal polarisiert, als Target benutzt (H_{\perp}).

Neben der hohen Flächendichte und der Zuverlässigkeit über viele Betriebsjahre war die Bestimmung der effektiven Targetpolarisation, mit welcher der Elektronenstrahl wechselwirkte, die schwierigste Anforderung an das interne Target. Es sollten die Kernspinpolarisation P_z , sowie im Falle von Deuterium die Tensorpolarisation P_{zz} , bestimmt werden. Die erforderliche Genauigkeit der absoluten gemittelten Polarisation über lange Messzeiten war $\delta P = 0.03$, während die statistische Genauigkeit nach ein paar Minuten 1% sein sollte, um mögliche zeitliche Schwankungen festzustellen. Dieses Ziel wurde durch den Einsatz einer *Sampling*-Technik in Verbindung mit eingehenden Simulationen und regelmäßigen Kalibrationen erfüllt.

Aufbau des Targets

Der Aufbau des Targets ist in Abbildung 37 zu sehen. Ein Strahl von H/D-Atomen wird von einem

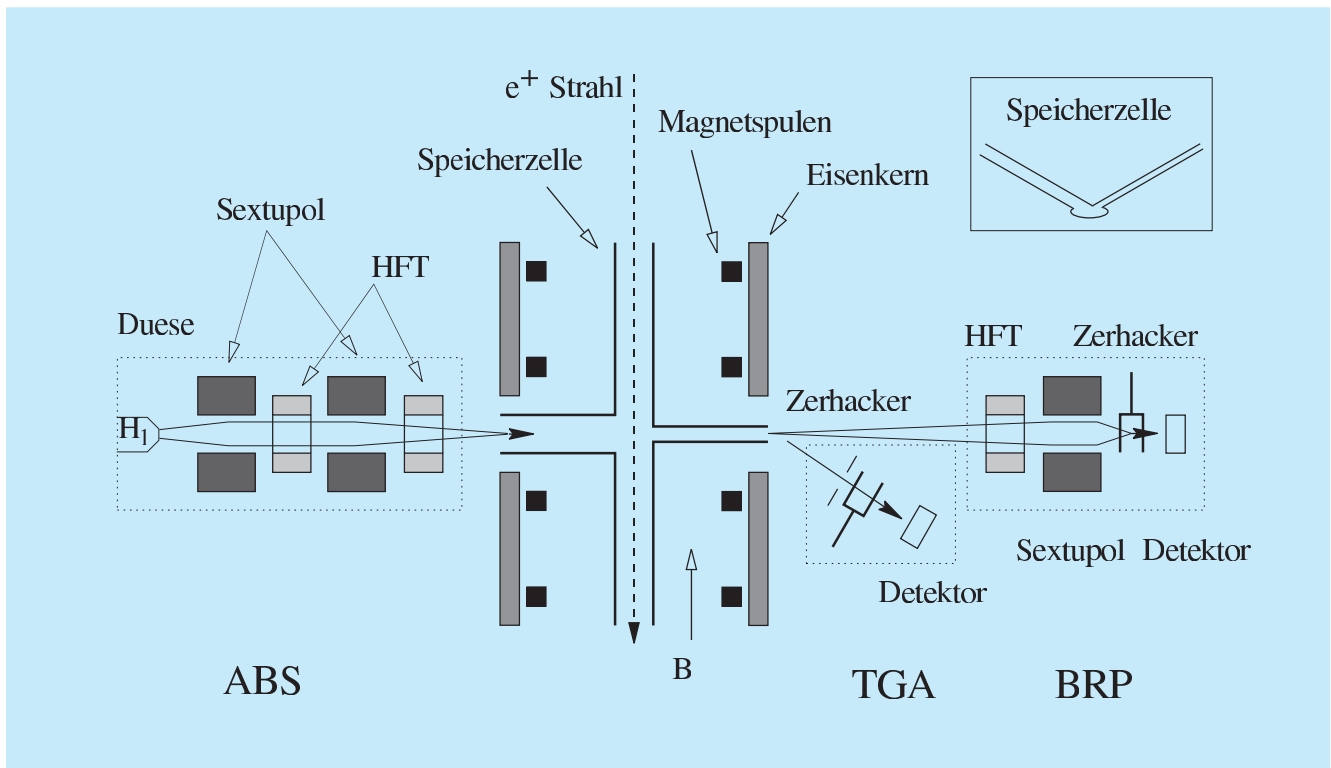


Abbildung 37: Schematische Ansicht des polarisierten HERMES-Targets. Von links nach rechts: Atomstrahlquelle (ABS), Targetkammer mit Speicherzelle und Magnet, und Analysesystem aus Targetgasanalysator (TGA) und Breit-Rabi-Polarimeter (BRP).

Mikrowellendissoziator und Strahlformungskomponenten erzeugt, welche Bestandteile der Atomstrahlquelle (ABS) sind. Dieser Atomstrahl wird mittels Stern-Gerlach-Separation durch Sextupol-Magneten aufgespalten bezüglich des Spins der Elektronen, d. h. Atome mit Spin $+\frac{1}{2}$ werden fokussiert, und Atome mit Spin $-\frac{1}{2}$ werden defokussiert. Diese Ausrichtung der Elektronenspins wird mittels adiabatischer Hochfrequenzübergänge auf den Kern übertragen, d. h. Besetzungen von Hyperfeinzuständen werden durch Hochfrequenzfelder in Verbindung mit Magnetfeldern ausgetauscht.

Der kernspinpolarisierte Atomstrahl wird nun in das Zentrum der dünnwandigen Speicherzelle über ein Eintrittsröhrchen injiziert, die Atome diffundieren zu den offenen Enden der Zelle und werden dort durch ein Hochvakuumssystem abgepumpt. Aufgrund der häufigen

Stöße an der Zellwand verbleiben die Atome länger in der Zelle wodurch viel höhere Dichten als in üblichen Gastargets erreicht werden. Die Speicherzelle besteht aus einer 40 cm langen Aluminiumröhre mit einem elliptischen Querschnitt ($21 \text{ mm} \times 8.9 \text{ mm}$), welche mit so genanntem Drifilm beschichtet ist, um Wandstoßeffekte zu minimieren. Das magnetische Haltefeld, in welchem sich die Zelle befindet, war in den Jahren 1996–2000 longitudinal zum Elektronenstrahl ausgerichtet und hatte eine Feldstärke von 330 mT. Es wurde von einem supraleitenden Magneten erzeugt. Das transversale Feld in den Jahren 2002–2005 wurde von einem herkömmlichen Dipolmagneten generiert.

Durch eine dünne *Sampling*-Röhre wurden der Speicherzelle Stichproben des Gases entnommen. Diese wurden mit einem Targetgasanalysator (TGA) untersucht, um den atomaren Anteil im Gas zu bestimmen.

Ein so genanntes Breit-Rabi-Polarimeter (BRP) maß die Besetzung der Hyperfeinzustände, um die Polarisierung der Atome zu bestimmen.

Targetpolarisation

Die mittlere Polarisierung P_T der Nukleonen des Targets ist ein fundamentaler Parameter des HERMES-Experimentes. Das Problem ist, die gemessene Polarisierung der Atome in der Stichprobe mit der dichtegegewichteten mittleren Polarisierung der Nukleonen in der Speicherzelle zu verbinden.

In der Speicherzelle können die Atome des Targets verschiedene Wechselwirkungen erfahren, welche einen Einfluss auf die mittlere Targetpolarisation P_T haben. Das vollständige Verständnis dieser Wechselwirkungen ist daher Voraussetzung, um die systematische Unsicherheit der Targetpolarisation zu reduzieren. Die Wechselwirkungsprozesse teilen sich in zwei Kategorien: Rekombination und Spin-Relaxation. Beide finden als Oberflächeneffekte an den Speicherzellwänden statt. Spinaustauschstöße und resonante Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl sind Volumeneffekte. Die Operationsbedingungen des Targets müssen so gewählt werden, dass diese ungewollten Effekte so weit wie möglich unterdrückt werden.

Die mittlere Targetpolarisation P_T , die bei der Wechselwirkung mit dem polarisierten Elektronenstrahl zum Tragen kommt, ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$P_T = \alpha_0 \alpha_r P_a + \alpha_0 (1 - \alpha_r) \beta P_a,$$

wobei α_0 der von der ABS injizierte atomare Anteil an den Nukleonen bzw. der atomare Anteil ohne Rekombination ist. Die Größe α_r bezeichnet den Anteil der Nukleonen in Atomen, der nicht rekombiniert ist und $\beta = P_m/P_a$ repräsentiert das Verhältnis der Kernspinpolarisation P_m der Moleküle, welche durch Rekombination entstanden sind, relativ zur Kernspinpolarisation der Atome P_a . Der Wert von $\beta = 0.68$ wurde für die experimentellen Bedingungen bei HERMES gemessen.

Die Werte für α_0 , α_r und P_a wurden aus den Messungen des TGA und BRP unter Verwendung verschiedener

Kalibrationen berechnet. Da beide Detektoren Stichproben aus dem Zentrum der Speicherzelle auswerten, ist es notwendig, diese Ergebnisse dem dazugehörigen Wert entlang der Speicherzellenachse zuzuordnen. Dies wird mit Hilfe so genannter *Sampling*-Korrekturen erreicht:

$$c_\alpha = c_\alpha(\alpha_r^{\text{TGA}}), \quad c_P = c_P(P_a^{\text{BRP}}).$$

Funktion des Targets

In Tabelle 3 werden die Kenndaten des HERMES-Targets aus den verschiedenen Operationsperioden verglichen. Neben der mittleren Polarisierung zeigt die Tabelle Abweichungen von den optimalen Werten, wie der Rekombination ($\Delta\alpha_r$) sowie der Depolarisation aufgrund verschiedener Phänomene: Spinaustauschstöße (ΔP_{SE}), Wandstoßdepolarisation (ΔP_{WD}) und strahlinduzierter Depolarisation (ΔP_{BI}). Desweiteren sind die über die Speicherzellenlänge integrierte Targetdichte oder Flächendichte t sowie ein relativer so genannter *factor of merit* (FOM), welcher Polarisierung und Targetdichte beinhaltet, angegeben. In den Jahren 1996/97 wurde eine größere Speicherzelle mit einem elliptischen Querschnitt (29 mm \times 9.8 mm) verwendet, womit ein höherer Leitwert einhergeht, der in eine um 40% niedrigere Dichte resultiert. Die Tabelle zeigt für das Jahr 2000 eine optimale Funktionweise des Targets für $D_{||}$. Hier wurde keine Rekombination ($\Delta\alpha_r = 0$) und keine Depolarisation ($\Delta P_{WD} = \Delta P_{SE} = \Delta P_{BI} = 0$) nachgewiesen. Dieses exzellente Verhalten wurde sowohl durch das niedrigere kritische Magnetfeld für Deuterium (11.7 mT verglichen mit 50.7 mT für Wasserstoff) als auch durch ein verbessertes Verständnis und eine bessere Ausführung der Speicherzellenbeschichtung erreicht. Letzteres ist auch für ein verbessertes Verhalten bezüglich der Rekombination ($\Delta\alpha_r$) des 2002 H_{\perp} Targets verglichen mit dem 1997 $H_{||}$ Target verantwortlich. Die Gesamtzahl tiefinelastischer Streueignisse (nach Datenqualitätsauswahl) mit den drei polarisierten Targets ist in Tabelle 4 angegeben.

Nach 10 Jahren erfolgreichen Betriebes wurde das interne polarisierte Target des HERMES-Experimentes

Target/Jahr	P^T	$\Delta\alpha_r$	ΔP_{SE}	ΔP_{WD}	ΔP_{BI}	t (10^{14} nucl/cm ²)	FOM (P^2t)
$H_{ }$ (1997)	0.851 ± 0.033	0.055	0.035	0.02	-	0.7	0.5
$D_{ }$ (2000)	0.845 ± 0.028	0.003	≤ 0.001	≤ 0.01	-	2.1	1.5
H_{\perp} (2002)	0.78 ± 0.05	0.022	0.055	0.055	0.01	1.1	0.67

Tabelle 3: Überblick über die Kenndaten des HERMES-Targets für verschiedene Zeitabschnitte. Erläuterung der Abkürzungen im Text.

Target (Jahr)	DIS/Millionen
$H_{ }$ (1996 – –97)	2.4
$D_{ }$ (1998 – –2000)	9.1
H_{\perp} (2002 – –05)	6.0

Tabelle 4: Gesamtzahl der aufgezeichneten tiefinelastischen Streueignisse mit den drei polarisierten Targets. Die Anzahl ist in Millionen angegeben.

im November 2005 außer Betrieb genommen. Es erzeugte eine hohe Polarisation mit einer absoluten systematischen Ungenauigkeit von nur 3–4%. Die Analyse dieser Daten führte zu einer Reihe einzigartiger Ergebnisse, die das bisher umfassendste Bild einer Beschreibung der Spinstruktur des Nukleons ergeben.

Physikalische Ergebnisse mit polarisierten Targets

Die Spinabhängige Strukturfunktion g_1

Eines der bedeutenden Ziele experimenteller Studien der vergangenen Jahre in Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) ist die Untersuchung der Spinstruktur des Nukleons und die Bestimmung der spezifischen Beiträge der Partonen im Nukleon zum Gesamtspin. Die Projektion des Nukleonspins auf eine vorgegebene Bezugsrichtung kann folgendermaßen aufgeschlüsselt

werden:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_z^q + L_z^g,$$

wobei $\Delta\Sigma$ der Anteil der Valenz- und Seequarkspins und ΔG der Anteil des Gluonspins am Nukleonspin ist. Über ihren intrinsischen Spin hinaus können Quarks und Gluonen auch noch Bahndrehimpulse L_z^q und L_z^g haben und damit zusätzliche Beiträge zum Spin des Gesamtsystems leisten.

Für die detaillierte Untersuchung des Anteils der Valenz- und Seequarks zum Nukleonspin wurden bei HERMES Doppelspin-Asymmetrien in der tiefinelastischen Streuung von longitudinal polarisierten Elektronen oder Positronen an longitudinal polarisierten Nukleonen gemessen. Inklusive Messungen, bei denen ausschließlich das gestreute Lepton nachgewiesen wird, sind nur auf das Quadrat der Quarkladungen sensitiv und erlauben daher nicht die Unterscheidung zwischen Quark und Antiquark. Diese wird durch die Analyse semiinklusive Streueignisse erreicht, bei der zusätzlich zum gestreuten Lepton ein Hadron nachgewiesen wird. HERMES hat auf diese Weise erstmalig die Helizitätsverteilungen für fünf Quarksorten direkt bestimmt, welche in vorangegangenen Beiträgen vorgestellt wurden.

In diesem Beitrag werden die finalen HERMES Ergebnisse der mit hoher Genauigkeit gemessenen spinabhängigen Strukturfunktion g_1 des Protons, Deuterons und Neutrons vorgestellt.

Für die typischen Schwerpunktsenergien bei HERMES der $\mathcal{O}(10 \text{ GeV})$ wird die tiefinelastische Streuung an

Nukleonen, in leading order (LO) QCD, durch die inkohärente Überlagerung der Wechselwirkungen eines virtuellen Photons mit den Quarks im Nukleon beschrieben. Aufgrund der Drehimpulserhaltung kann ein virtuelles Photon mit Spin 1 nur von einem Quark (Spin 1/2) gleicher Helizität, d. h. entgegengesetzter Spinorientierung, absorbiert werden. Da die Helizität des Targetnukleons bekannt ist, erhält man aus der Messung dieser spinabhängigen Streueignisse Rückschlüsse auf die Helizitätsverteilungen der Quarks im Nukleon. Die spinabhängige Strukturfunktion g_1 misst dabei die Differenz in der Anzahl von Quarks mit, bezüglich der Helizität des Targetnukleons, gleicher bzw. entgegengesetzter Helizität, summiert über alle Quarks und Antiquarks.

Die hier vorgestellten entgültigen Ergebnisse basieren auf der Analyse der im Jahre 1996 aufgezeichneten Proton-Daten, einer neuen Analyse der bereits publizierten Proton-Daten des Jahres 1997 sowie der Analyse der im Jahre 2000 aufgezeichneten Deuterium-Daten. Basierend auf über 9 Millionen Streueignissen ist die Deuterium-Messung die zurzeit weltweit präziseste im untersuchten kinematischen Bereich.

Mit Hilfe eines neuartigen Entfaltungsalgorithmus wurden die Einflüsse der Detektorauflösung und der QED-Strahlungsprozesse auf die gemessenen Asymmetrien korrigiert. Im Ergebnis dieser Korrektur sind die erhaltenen Datenpunkte nicht länger systematisch korreliert sondern nur noch statistisch. Diese statistische Korrelation kann vollständig bei der Berechnung von Momenten der Strukturfunktionen berücksichtigt werden.

Der Verlauf der spinabhängigen Strukturfunktionen ist in Abbildung 38 als Funktion der Skalenvariable x dargestellt. Die polarisierte Strukturfunktion g_1^n des Neutrons wurde auf zwei verschiedene Arten ermittelt: 1995, im ersten Jahr der Datennahme, wurde bei HERMES ein polarisiertes Helium-3 Target eingesetzt, das in guter Näherung als reines Neutrontarget angesehen werden kann, wodurch, wie in einer früheren Veröffentlichung beschrieben, g_1^n auf direktem Wege gemessen werden konnte. Alternativ dazu wurde aus der Kombination der Strukturfunktionen des Protons und des Deuterons das weltweit präziseste Ergebnis

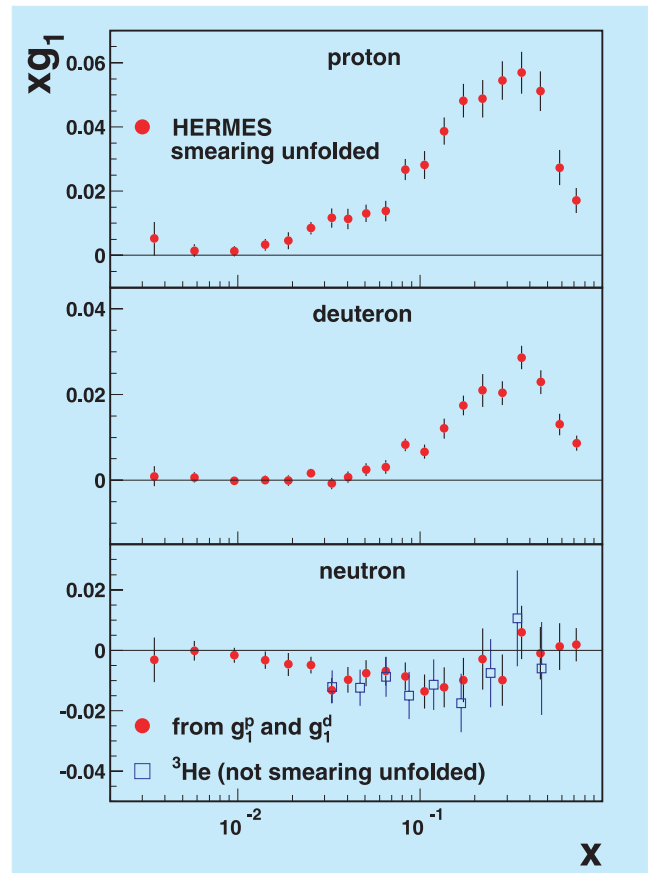


Abbildung 38: Verlauf der von HERMES gemessenen polarisierten Strukturfunktionen xg_1 des Protons, Deuterons und Neutrons als Funktion der Skalenvariable x .

zur Messung der polarisierten Neutronstrukturfunktion ermittelt. Diese neue Messung grenzt die möglichen Werte für g_1^n sehr gut ein und widerlegt insbesondere frühere Beobachtungen eines starken Anstiegs der Strukturfunktion zu negativen Werten bei niedrigen x .

In den vorliegenden Analysen wurde der kinematische Bereich der Messung im Vergleich zu den bereits veröffentlichten Proton-Daten zu niedrigeren Werten von x und damit zu niedrigeren Werten der Photonvirtualität Q^2 erweitert. Da in diesem kinematischen Bereich bisher nur sehr wenige Messungen existieren, reduzieren die neuen HERMES-Daten die Unsicherheiten in der Extrapolation in den bisher nicht vermessenen kinematischen Bereich $x \rightarrow 0$ bei der Bestimmung von Momenten der Strukturfunktionen. Wie in Abbil-

dung 38 gezeigt, erreichen im niedrigen x -Bereich die HERMES Deuteron-Daten wesentlich schneller einen Wert von Null als die Proton-Daten. Dies bedeutet, dass das Integral von g_1^d über x bereits für Werte $x < 0.4$ gesättigt ist. Dies ermöglicht die Bestimmung des ersten Momentes von g_1^d über den gesamten x -Bereich und damit des Beitrages der Quarkspins zum Spin des Nukleons, $\Delta\Sigma$, mit deutlich geringeren Unsicherheiten aufgrund der Extrapolation $x \rightarrow 0$. Die HERMES-Daten legen einen Wert von $\Delta\Sigma \approx 0.35 \pm 0.04$ bei einer Photonvirtualität von $Q^2 = 5.0 \text{ GeV}^2$ nahe.

QCD-Analyse der spinabhängigen Strukturfunktionen

Die Beschreibung der spinabhängigen Strukturfunktionen g_1^p , g_1^n und g_1^d im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) ist Inhalt einer QCD-Analyse der Daten. Das theoretische Rüstzeug dazu, wie Aufspaltungsfunktionen und Wilsonkoeffizienten für den polarisierten Fall, stehen bis zu next-to-leading order (NLO) zur Verfügung. Ein QCD-Analyseprogramm ist entweder im so genannten MELLIN- oder im x -Raum konzipiert. Die HERMES-Kollaboration verfügt über QCD-Analyseprogramme sowohl im MELLIN- als auch im x -Raum. In einem solchen Programm werden die spinabhängigen Strukturfunktionen aus Partonverteilungen und entsprechenden Wilsonkoeffizienten zusammengesetzt. Das grundlegende Ziel einer QCD-Analyse ist, eine geeignete Parametrisierung der benötigten Partonverteilungen zu finden.

Innerhalb der HERMES-Kollaboration wurde eine NLO QCD-Analyse der aktuellen Weltdaten an polarisierter inklusiver tiefinelastischer Lepton-Nukleonstreuung durchgeführt. Die Weltdaten waren kürzlich ergänzt worden durch reanalysierte Proton- und sehr präzise Deuteron-Daten der HERMES-Kollaboration (wie im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt), durch neue Neutron-Daten bei hohem Bjorken- x seitens der JLAB-Hall-A-Kollaboration und durch neue Deuteron-Daten der COMPASS-Kollaboration. Im Ergebnis dieser QCD-Analyse wurden neue Parametrisierungen der polarisierten Partonverteilungen und ihrer korrelierten statistischen 1σ Fehler erhalten. Dabei zeigte es

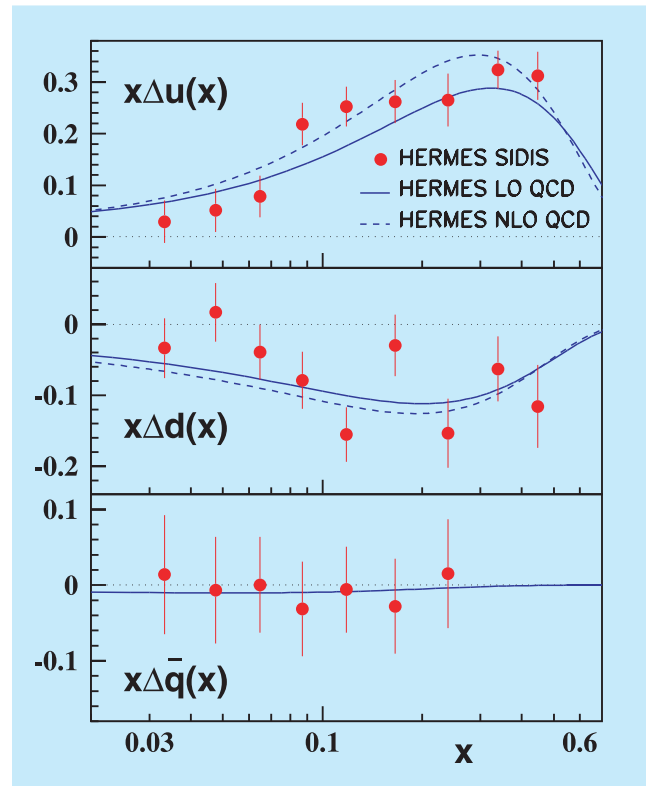


Abbildung 39: Die Helizitätsverteilungen $x\Delta u(x)$, $x\Delta d(x)$ und $x\Delta \bar{q}(x)$ bei $Q^2 = 2.5 \text{ GeV}^2$ als Funktion von x in leading (LO, volle Linie) und next-to-leading (NLO, gestrichelte Linie) order QCD verglichen mit den HERMES Resultaten für die flavour-separierten Helizitätsverteilungen der Analyse semiinklusive Daten. Die Fehlerbalken zeigen nur die statistische Unsicherheit.

sich, dass die so erhaltenen Helizitätsverteilungen vergleichbar sind mit denen einer HERMES leading order (LO) QCD-Analyse, die eine Separation der Helizitätsverteilungen für Up-, Down- und Sea-Quarks unter Einbeziehung auch semiinklusive Daten zum Ziel hatte (SIDIS-Analyse). Der Vergleich der Ergebnisse ist in Abbildung 39 zu sehen. Die Kurven stammen aus der hier beschriebenen QCD-Analyse inklusiver Daten, während die Datenpunkte das Ergebnis der LO SIDIS-Analyse sind. Sowohl die LO- als auch die NLO-Kurve stimmt mit den Datenpunkten im Mittel überein. Dabei ist die LO-Kurve, die der LO SIDIS-Analyse besser entsprechen sollte, in keiner Weise favorisiert.

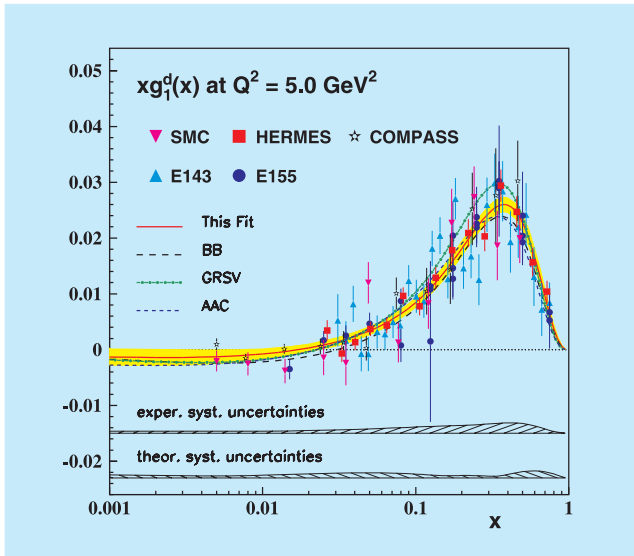


Abbildung 40: Die spinabhängige Strukturfunktion $xg_1^d(x)$ in Abhängigkeit von x . Die experimentellen Daten sind für einen $Q^2 = 5 \text{ GeV}^2$ berechnet. Die Fehlerbalken zeigen die quadratisch addierten statistischen und systematischen Unsicherheiten. Die experimentellen Daten werden sehr gut durch die verschiedenen QCD-Analysen, dargestellt durch unterschiedliche Linien, beschrieben.

Die Welt Daten der spinabhängigen Strukturfunktionen $xg_1^p(x)$, $xg_1^n(x)$ und $xg_1^d(x)$ werden durch die HERMES QCD-Analyse sehr gut beschrieben. Als Beispiel ist in Abbildung 40 die Strukturfunktion $xg_1^d(x)$ gezeigt. Neben dem Ergebnis der vorliegenden QCD-Analyse sind in Abbildung 40 auch Resultate anderer QCD-Analysen zu sehen. Alle Ergebnisse sind für einen Q^2 -Wert von 5 GeV^2 berechnet, der einen geeigneten Weltmittelwert für diese Variable (negatives Quadrat des 4er-Impulsübertrags) darstellt.

Der Einfluss der neuen HERMES-Daten auf die Ergebnisse der NLO QCD-Analyse läßt sich am besten am Verhalten der Helizitätsverteilung des Gluons, $\Delta G(x)$, verdeutlichen. Die neuen HERMES-Daten schränken den Beitrag des Gluons zum Spin des Nukleons weiter ein, wie aus Abbildung 41 zu ersehen ist. Als Beitrag der Quarks zum Nukleonspin wurde im Rahmen dieser QCD-Analyse bei $Q^2 = 4 \text{ GeV}^2$ ein Wert von

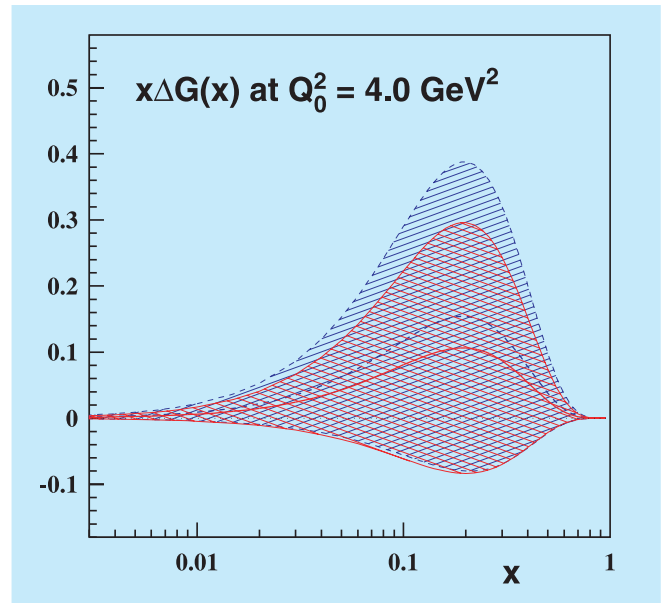


Abbildung 41: Die aus den Welt Daten einschließlich der neuen HERMES-Daten (geschlossene Kurve) bzw. ohne diese (gestrichelte Kurve) extrahierte Helizitätsverteilung $x\Delta G(x)$ für $Q_0^2 = 4.0 \text{ GeV}^2$ als Funktion von x . Der Bereich gekreuzter Linien repräsentiert die Unsicherheit in der Bestimmung von $x\Delta G(x)$ aus dem gesamten Welt Datensatz, einschließlich der HERMES-Daten.

$\Delta\Sigma = 0.216 \pm 0.108(\text{stat}) \pm 0.051(\text{exp}) \pm 0.056(\text{theo})$ bestimmt.

Ein weiteres Ergebnis der QCD-Analyse ist ein Wert für die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung, gemessen an der Masse des Z^0 -Bosons, von

$$\alpha_s(M_Z^2) = 0.1135 \begin{matrix} +0.0092 \\ -0.0117 \end{matrix} \text{ (total)}.$$

Semiinklusive azimutale Einzelspin-Asymmetrien

In der Feynmanschen Beschreibung der Nukleonstruktur, dem Partonmodell, bestehen Nukleonen (Protonen und Neutronen) aus sich annähernd kollinear bewegenden Partonen (Quarks und Gluonen). Deren Spinausrichtung führt zu drei Verteilungsfunktionen für Quarks

und zwei für Gluonen. Von den drei Quarkverteilungen wurden bisher, mit unterschiedlicher Präzision, die unpolarisierte Quarkverteilung und die Helizitätsverteilung gemessen. Erstere gibt an, wieviele Quarks mit einem bestimmten Impulsbruchteil¹ x im Nukleon zu finden sind. Bei der Helizitätsverteilung betrachtet man zusätzlich die Spinausrichtung der Quarks: ist sie parallel oder antiparallel zum Nukleonspin, wenn dieser entlang der Bewegungsrichtung zeigt. Die dritte Verteilung, *Transversity*, entzog sich der Aufmerksamkeit für lange Zeit, da transversale Spineffekte als unterdrückt angesehen wurden. Erst in den letzten 15 Jahren bekam die *Transversity*-Verteilung, welche die Differenz in der Anzahl von Quarks mit Spin parallel bzw. antiparallel zum Spin von transversal polarisierten Nukleonen angibt, die verdiente Aufmerksamkeit.

Die Messung der *Transversity*-Verteilung wird dadurch erschwert, dass die Verteilung ungerade unter Chiralitätsumkehr ist. Da in harten Streuprozessen die Chiralität eine Erhaltungsgröße ist, muss die *Transversity*-Verteilung mit einer weiteren chiral-ungeraden Größe kombiniert werden. In der semiinklusiven tiefinelastischen Streuung von Positronen (Elektronen) an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget, wie z. B. am HERMES-Experiment realisiert, können chiral-ungerade Fragmentationsfunktionen diese Aufgabe übernehmen. Fragmentationsfunktionen beschreiben die Entwicklung vom getroffenen Quark zu den verschiedenen produzierten Hadronen. Diese hängt in der Regel nicht nur von der Energie der produzierten Hadronen ab, sondern auch von deren Bewegungsrichtung. Für die Messung der *Transversity*-Verteilung benötigt man Fragmentationsfunktionen, die von der Quarkpolarisation abhängen. Diese Abhängigkeit kann z. B. eine Korrelation der Bewegungsrichtung der produzierten Hadronen mit der Richtung des Quarkspins sein. Die Kombination aus *Transversity* und solch einer Fragmentationsfunktion führt zu Einzelspin-Asymmetrien

¹Die Variable x entspricht der Skalenvariable bzw. Bjorken-Variable x in den vorangegangenen Abschnitten.

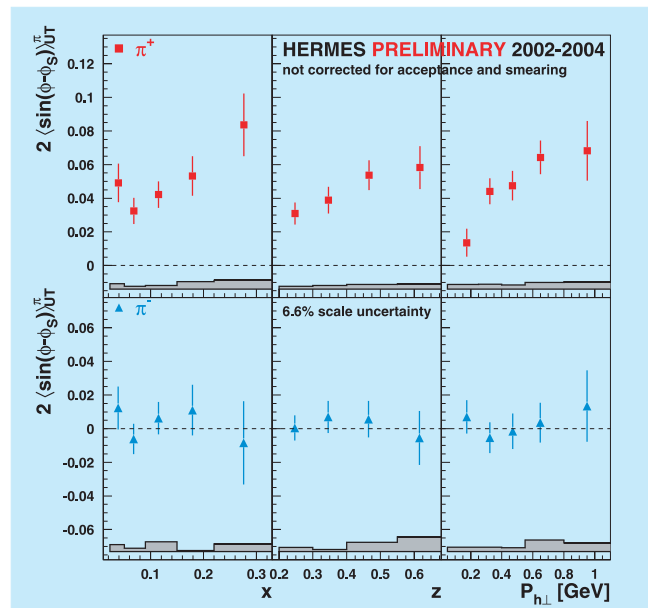


Abbildung 42: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semiinklusiven azimuthalen Asymmetrien von geladenen Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im so genannten Sivers-Winkel, welche proportional zur Sivers Quarkverteilung sind, in Abhängigkeit von x , z und $P_{h\perp}$.

in der azimuthalen Verteilung der produzierten Hadronen. Beispiele dafür sind die so genannten Collins-Asymmetrie (mindestens ein Hadron nachgewiesen) und verschiedene Asymmetrien in der Hadronpaar-Produktion.

Zur Überraschung vieler fand man vor wenigen Jahren heraus, dass nicht nur Fragmentationsfunktionen zu Einzelspin-Asymmetrien führen können, sondern auch eine bestimmte Klasse von Quarkverteilungsfunktionen. Diese Quarkverteilungen berücksichtigen die geringe Abweichung der Bewegungsrichtung der Quarks im Nukleon von der Bewegungsrichtung des Nukleons. Da ein nicht verschwindender Bahndrehimpuls der Quarks innerhalb des Nukleons solch eine transversale Komponente verursachen kann, ist die Hoffnung groß, dass man mit Hilfe dieser Quarkverteilungsfunktionen einen experimentellen Zugang zum Bahndrehimpuls erhält. Dies ist besonders interessant, da es nur wenige bekannte Alternativen gibt, die eine Messung des Bahndrehimpulses der Quarks ermögli-

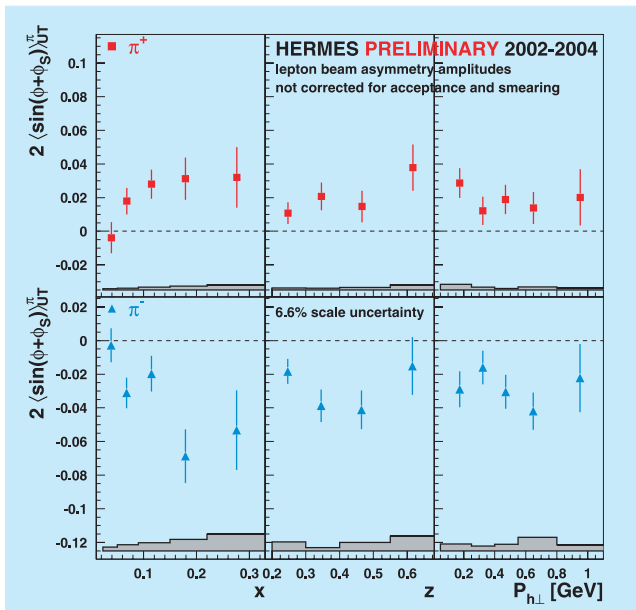


Abbildung 43: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semiinklusiven azimuthalen Asymmetrien von geladenen Pionen an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien im so genannten Collins-Winkel, welche proportional zur Transversity-Verteilung sind, in Abhängigkeit von x , z und $P_{h\perp}$.

chen. Folglich wird der Messung z. B. der so genannten *Sivers*-Asymmetrie in semiinklusive tiefinelastischer Streuung große Aufmerksamkeit gewidmet. Namengebend für diese Asymmetrie ist die sie verursachende *Sivers*-Quarkverteilung.

Ein Meilenstein im HERMES-Physikprogramm im Jahr 2005 war die Bestätigung mit erheblich höherer Präzision der weltweit ersten Ergebnisse für die *Collins*- und *Sivers*-Asymmetrien, die Anfang des Jahres veröffentlicht wurden. In Abbildung 42 sieht man die vorläufigen Ergebnisse für die *Sivers*-Asymmetrien, welche aus den in den Jahren 2002–2004 aufgenommenen Daten extrahiert wurden. Für positive Pionen (π^+) ist die Asymmetrie signifikant von Null verschieden. Da π^+ Mesonen vorrangig durch Streuung an Up-Quarks entstehen, kann man daraus ableiten, dass auch die *Sivers*-Quarkverteilung für Up-Quarks von Null verschieden sein muss. Die Asymmetrien für ne-

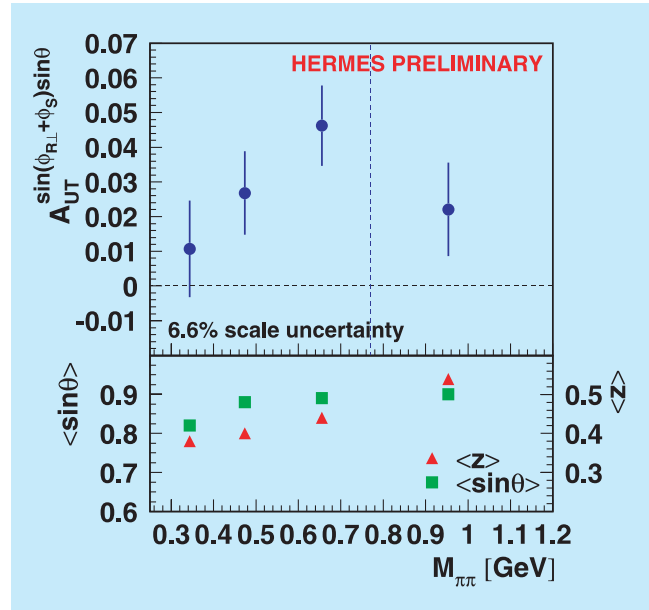


Abbildung 44: Vorläufige HERMES-Ergebnisse zu semiinklusiven azimuthalen Asymmetrien von geladenen Pionenpaaren an einem transversal polarisierten Wasserstofftarget. Gezeigt sind die Asymmetrien in Abhängigkeit von der invarianten Masse des Pionenpaares. Die ρ^0 Masse ist durch eine gestrichelte vertikale Linie gekennzeichnet.

gative Pionen π^- ist verträglich mit Null. Zusätzlich zur Abhängigkeit der Asymmetrie von x und z , dem Energiebruchteil des während der Streuung ausgetauschten virtuellen Photons, der auf das Hadron übertragen wurde, wurde dieses Mal auch die Abhängigkeit vom transversalen Impuls $P_{h\perp}$ des Hadrons untersucht. Wie erwartet, steigt die Asymmetrie für größer werdendes $P_{h\perp}$ an. Die vorläufigen Ergebnisse für die *Collins*-Asymmetrie sind in Abbildung 43 gezeigt. Auch hier wurden die ursprünglichen Ergebnisse bestätigt, die nur auf der Analyse der Daten des ersten Jahres mit transversal polarisiertem Target beruhen. Insbesondere die großen Asymmetrien für negative Pionen überraschten damals und können nur damit erklärt werden, dass Pionen mit unterschiedlicher Ladung vorzugsweise in entgegengesetzte Richtungen fliegen, wenn sie in der Fragmentation von Quarks der gleichen Sorte entstehen. Auch für die *Collins*-Asymmetrie wurde zusätzlich die $P_{h\perp}$ -Abhängigkeit untersucht, was zusätzliche Ein-

blicke in den Fragmentationsprozess liefert. Ein weiteres bedeutendes Resultat des HERMES-Experiments ist die gemessene Asymmetrie in der Ausrichtung von zwei produzierten Pionen in Abhängigkeit vom Nukleonspin. Diese weltweit ersten Ergebnisse sind sehr vielversprechend, da sie ebenso wie die *Collins*-Asymmetrien zur Messung der *Transversity*-Verteilung verwendet werden können. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Einzelspin-Asymmetrien, wurde hier nicht die Richtung eines produzierten Pions untersucht, sondern die Ausrichtung der Ebene, die von den Impulsen zweier Pionen aufgespannt wird. Der wesentliche Vorteil dieser Art von Einzelspin-Asymmetrien gegenüber der *Collins*-Asymmetrie liegt in ihrer einfacheren Interpretation bezüglich Quarkverteilungs- und Fragmentationsfunktionen. Die Kehrseite ist jedoch, dass man für diese Messung erheblich mehr Streuergebnisse benötigt. Für die Pionenpaar-Asymmetrie gibt es zwei grundlegend gegensätzliche Vorhersagen. Eine davon erwartet einen Vorzeichenwechsel der Asymmetrie als Funktion von der invarianten Masse der beiden Pionen, welcher in der Umgebung der Masse des ρ^0 Mesons stattfinden soll, also ungefähr bei 770 MeV. In Abbildung 44 sieht man, dass die HERMES Ergebnisse diese Vorhersage mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen (die ρ^0 Masse ist als gestrichelte vertikale Linie eingezeichnet). Die Asymmetrie bleibt im gesamten gemessenen Bereich positiv und hat ihr Maximum wahrscheinlich in der Nähe der ρ^0 Masse. Die zweite Vorhersage kann die präsentierten Daten erheblich besser beschreiben.

Die weiteren Aussichten des HERMES Spinprogramms mit transversal polarisiertem Target sind sehr gut, da der Datensatz 2005 mehr als verdoppelt wurde. Dies ermöglicht das vertiefende Studium der *Transversity*- wie auch der *Sivers*-Verteilung.

Physikalische Ergebnisse mit unpolarisierten Targets

Produktion von zwei Hadronen im nuklearen Medium

Der Kenntnisstand über die Zeit, die zur Erzeugung eines Hadrons in physikalischen Reaktionen bei hohen Energien nötig ist, ist sehr beschränkt. Die Bildungsdauer (*formation time*) der Hadronen offenbart grundlegend neues Wissen über zusammengesetzte Systeme aus Quarks und Gluonen. Darüberhinaus sind quantitative Ergebnisse über die Hadronbildungsdauer zur Interpretation von Schwerionenkollisionen notwendig, die die Suche nach einem neuen Materiezustand, dem Quark-Gluon Plasma, zum Ziel haben.

Experimentellen Aufschluss über den Bildungsprozess von Hadronen und seine räumliche und zeitliche Entwicklung erhält man durch Einbettung des Prozesses in einen Atomkern. Das gestreute Quark bzw. das erzeugte Hadron kann mit der umgebenden Materie wechselwirken. Daher wird die Anzahl der im Experiment beobachteten Hadronen bei Streuung an einem Quark in einem schweren Kern kleiner sein als in einem Proton.

Trotz neuester, präziser experimenteller Ergebnisse von HERMES über die Fragmentation von Quarks in π^\pm , π^0 , K^\pm , p und \bar{p} in verschiedenen Targets von Deuterium bis hin zu Krypton sind theoretische Modelle, die die Hadronisierung im nuklearen Medium zu beschreiben versuchen, uneinig über die relativen Beiträge der verschiedenen grundlegenden Mechanismen. Daher wurde in dieser Analyse eine neue Observable (R_{2h}) gemessen. Anhand des Verhältnisses zwischen Ereignissen mit mindestens zwei Hadronen zu Ereignissen mit mindestens einem Hadron ist es möglich, die Korrelation nuklearer Effekte zwischen Hadronen, die in der selben Wechselwirkung aber zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten innerhalb des Kerns erzeugt wurden, zu untersuchen. Dies ist schematisch in Abbildung 45 dargestellt.

Angenommen Hadronabsorption im Endzustand (z. B. Hadron-Nukleon-Wechselwirkung) ist der primär verantwortliche Mechanismus, so wird eine Verringerung

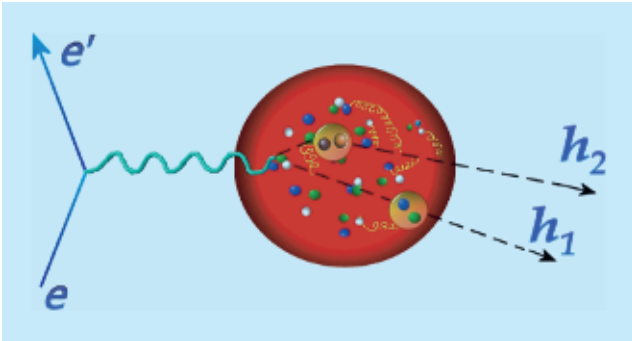


Abbildung 45: Bildhafte Darstellung der Erzeugung zweier Hadronen durch Elektronenstreuung in einem Kern.

von R_{2h} bei höheren Massenzahlen erwartet, da der Effekt auf die zwei Hadronen unkorreliert ist. Mit anderen Worten, aufgrund der Tatsache, dass das zweite (zweitführende) Hadron tiefer innerhalb der nuklearen Materie erzeugt wurde, ist die Wahrscheinlichkeit für hadronische Wechselwirkungen mit der nuklearen Materie höher als für das erste (führende) Hadron. Im Gegensatz dazu sollte R_{2h} nur sehr wenig von der Massenzahl abhängen, falls der Energieverlust des gestreuten Quarks der einzig verantwortliche Mechanismus ist. Die in Abbildung 46 dargestellten Ergebnisse der Analyse zeigen, dass der nukleare Effekt bei der Erzeugung von zwei Hadronen viel kleiner ist als bei den bereits veröffentlichten Ergebnissen der einfachen Hadronunterdrückung. Darüber hinaus gibt es keinen signifikanten Unterschied im Verhalten von R_{2h} bei Verwendung der Targets aus Stickstoff, Krypton und Xenon, was eine nur sehr schwache Abhängigkeit oder sogar Unabhängigkeit von der atomaren Massenzahl des nuklearen Mediums, in dem die Hadronisierung stattfindet, nahe legt.

In Abbildung 46 sind außerdem Kurven von Modellrechnungen wiedergegeben. Das obere Diagramm zeigt das Ergebnis von Berechnungen, die sowohl Energieverlust als auch Absorption im Medium berücksichtigen. Obwohl der allgemeine Trend der Daten reproduziert wird, sagt das Modell einen Effekt voraus, der für Xenon und Krypton doppelt so groß ist wie für Stickstoff. Diese Berechnungen werden nicht vollständig durch die Daten bestätigt. Im unteren Dia-

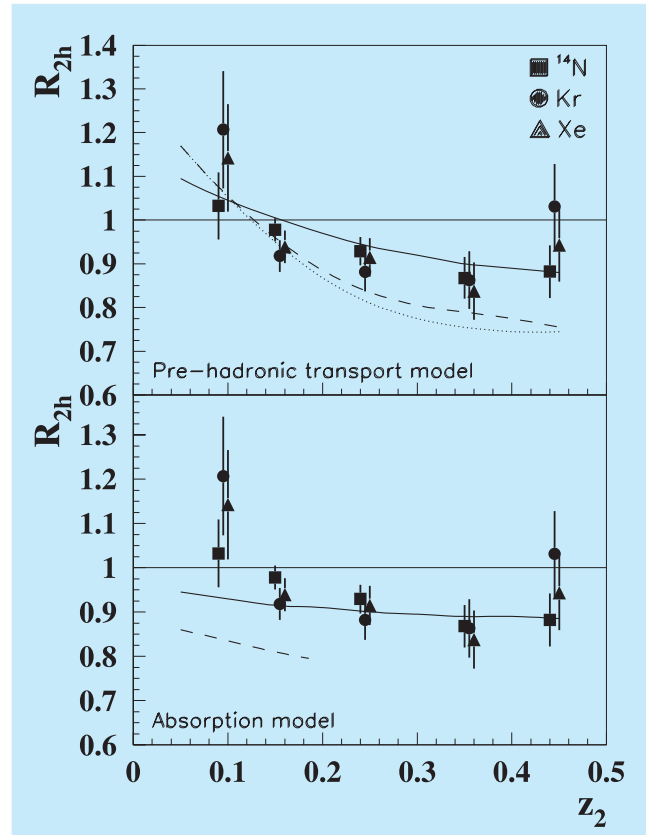


Abbildung 46: Das Verhältnis R_{2h} als Funktion des Energiebruchteils des zweitführenden Hadrons in Bezug auf die Energie des virtuellen Photons, z_2 , für Stickstoff, Krypton und Xenon. Die Kurven (^{14}N : durchgehend; Kr: gestrichelt; Xe: gepunktet) basieren auf einem pre-hadronischen Transportmodell (oberes Diagramm) sowie einem Absorptionsmodell (unteres Diagramm).

gramm werden dieselben Daten mit einer Modellrechnung verglichen, die sich auf die Berücksichtigung von Hadronwechselwirkungen im Medium beschränkt. Die Daten scheinen die zugrundeliegende Vermutung auszuschließen.

Ähnlich wie Messungen von Jet-Korrelationen in Kollisionen von Schwerionen, liefern die Observablen für die Produktion von zwei Hadronen in semiinklusive tiefinelastischer Streuung neue Informationen für die Bewertung von Hadronisierungsmodellen in Kernen, die ununterscheidbar in einfacher Hadronproduktion sind.

HERA-B-Experiment

Beteiligte Institute: NIKHEF Amsterdam, Univ. Texas Austin, Univ. Barcelona, IHEP und 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. und NIKHEF Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

Sprecher: M. Medinnis, DESY

Mit dem HERA-B-Experiment soll insbesondere die Produktion schwerer Quarks in hochenergetischen Wechselwirkungen von Protonen mit Kernen untersucht werden. Das Experiment benutzt den HERA-Protonstrahl, dessen Halo an den Atomkernen verschiedener dünner Drahttargets gestreut wird. Mit einer großen Akzeptanz, vorzüglicher Teilchenidentifikation und einem hochauflösendem Vetexdetektor bietet das HERA-B-Spektrometer die besten Voraussetzungen für detaillierte Studien komplexer Vielteilchen-Endzustände. Der Zwei-Lepton-Trigger von HERA-B kann mit einer ausgeklügelten, schnellen Elektronik Wechselwirkungen, die zwei Leptonen enthalten, aus einem hohen Untergrund selektieren, zum Beispiel werden die Zerfälle von J/ψ -Mesonen in Leptonpaare unter einer milliardenfach höheren Zahl von anderen Ereignissen herausgefiltert. Durch die Benutzung von Targetdrähten aus verschiedenen Materialien (Kohlenstoff, Titan, Wolfram) kann mit HERA-B die Abhängigkeit der Teilchenproduktion von der Kernmassenzahl untersucht werden.

Verschiedene Studien zu Produktionswahrscheinlichkeiten bestimmter hadronischer Zustände oder anderen Charakteristika der Teilchenproduktion befinden sich in einem fortgeschrittenen Stadium oder konnten bereits abgeschlossen werden. Mit den Ergebnissen sollen

tieferen Einsichten in das Verhalten der starken Wechselwirkung gewonnen werden und die Vorhersagen der Quantenchromodynamik (QCD), der Theorie der starken Wechselwirkung, überprüft werden.

Den Untersuchungen liegen zwei große Datensätze zugrunde, die während der abschließenden Datennahme des HERA-B-Experimentes 2002/2003 aufgezeichnet wurden. Einer der Datensätze enthält insgesamt 150 Millionen Ereignisse, die mit dem Zwei-Lepton-Trigger genommen wurden, der andere enthält 200 Millionen Ereignisse, die mit einem einfachen *Minimum Bias* Trigger genommen wurden. Die verschiedenen Analysen können nach dem Quarkinhalt, entsprechend der Flavour-Quantenzahl, der untersuchten Zustände kategorisiert werden:

- Zustände mit Beauty-Quarks (b): Die Studie schließt die Messung der totalen Wirkungsquerschnitte für die Produktion von Hadronen, die b-Quarks enthalten, und für die Produktion von Υ -Mesonen (gebundene Zustände von b-Quarks und deren Antiteilchen \bar{b}) ein.
- Zustände mit Charm-Quarks (c): Ähnlich zu der Studie der Beauty-Zustände wurden die totalen Wirkungsquerschnitte für die Produktion von Hadronen mit c-Quarks und für die Produktion von J/ψ -Mesonen (gebundene Zustände von

c-Quarks und deren Antiteilchen \bar{c}) bestimmt. Zusätzlich erlaubt ein großer Datensatz mit J/ψ -Ereignissen, die mit dem Zwei-Lepton-Trigger genommen wurden, eine detailliertere Studie der J/ψ -Produktion, wie die Abhängigkeit vom Impuls der produzierten J/ψ -Mesonen, der J/ψ -Polarisation und der Abhängigkeit vom Atomgewicht des Targetmaterials. Zum Vergleich mit QCD-Vorhersagen sind auch die Untersuchungen der Produktion von zwei weiteren $c\bar{c}$ -Zuständen, den ψ' - und χ_{c-} -Mesonen, wichtig.

- Zustände mit Strange-Quarks (s): Laufende oder bereits abgeschlossene Analysen schließen die Produktion von Mesonen (K^0 , $K^{*}(892)^0$, $\phi(1020)$) und (Anti-)Baryonen (Λ^0 , $\Sigma(1385)$, Ξ^- , Ω^-) mit Strangeness-Inhalt ein.
- Sonstige Zustände: Diese Kategorie enthält die Produktion von Deuteronen und von Photonen mit hohem Transversalimpuls sowie die Studie zur Ausbildung von Teilchenjets in den Proton-Kern-Reaktionen.

Die Analysearbeiten zu diesen Themen sind entweder abgeschlossen oder in einem fortgeschrittenen Stadium und die jeweiligen Publikationen sind eingereicht oder in Vorbereitung. Die HERA-B-Kollaboration plant, die Datenanalyse und die Publikation der Ergebnisse bis Ende 2006 abzuschließen. Im folgenden Abschnitt wollen wir Aspekte unserer Arbeit mit der Diskussion der Messungen der totalen Wirkungsquerschnitte, die 2005 abgeschlossen wurden, darstellen.

Messungen von Produktionswirkungsquerschnitten

Der totale Wirkungsquerschnitt für die Produktion eines Teilchens ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teilchen in einer Kollision (bei HERA-B kollidiert ein Proton mit einem Atomkern) erzeugt wird. Die Größe des Wirkungsquerschnitts hängt von der Art der kollidierenden und erzeugten Teilchen und von der

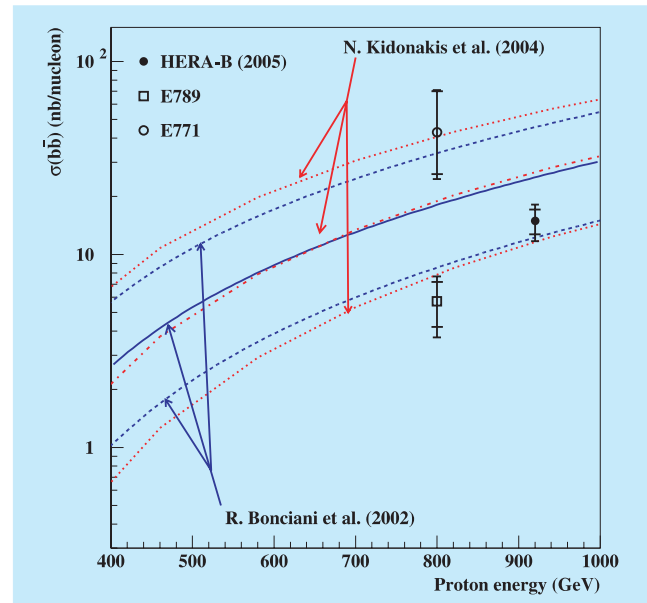


Abbildung 47: Die verfügbaren Messungen der Beauty-Produktion von fixed target Experimenten als Funktion der Energie des Protonenstrahls. Die Kurven stellen Vorhersagen der perturbativen QCD dar. Der Bereich der Unsicherheiten der Vorhersagen werden durch die oberen und unteren Kurven angegeben.

Energie des Prozesses ab. In Reaktionen, die durch die starke Wechselwirkung vermittelt werden, können Quarks nur mit ihren entsprechenden Antiquarks erzeugt werden. Nach ihrer Erzeugung *hadronisieren* die Quarks, indem ihre Energie zur Erzeugung neuer Quark-Antiquark-Paare aufgeteilt wird und schließlich aus den Quarks und Antiquarks Hadronen (Mesonen und Baryonen) gebildet werden. Die Wirkungsquerschnitte für die Produktion von Hadronen hängen von der Masse ihrer Konstituenten, den Quarks, (und damit auch von deren Flavour) ab. So sind in der Proton-Proton-Streuung die Produktionswirkungsquerschnitte von Mesonen mit Beauty-Quarks kleiner als die von Mesonen mit Charm-Quarks und die wiederum kleiner als die von Mesonen mit Strange-Quarks (die Quarkmassen werden in der Reihenfolge der Flavours Beauty, Charm und Strangeness kleiner). Qualitativ ergibt sich diese Massenabhängigkeit daraus, dass eine Proton-Proton-Kollision als die Kollision der Konstituenten der Protonen interpretiert werden kann und die Konstitu-

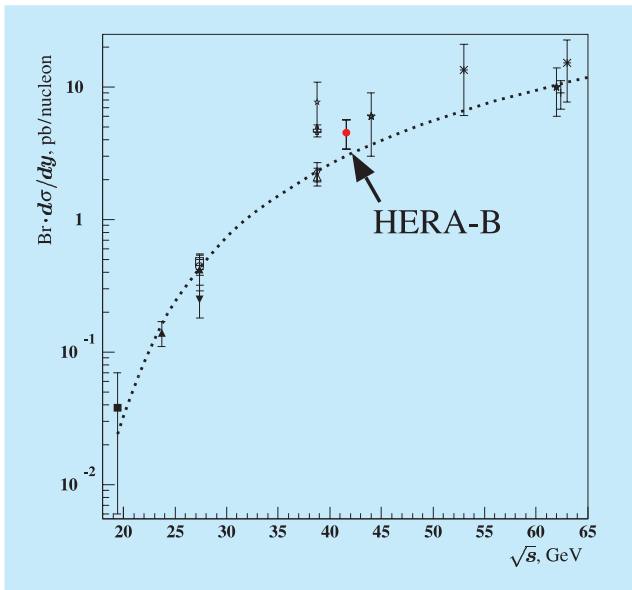


Abbildung 48: Die verfügbaren Messungen des Υ -Produktionswirkungsquerschnittes bei zentraler Rapidität in Proton-Kern-Streuungen als Funktion der Proton-Nukleon-Schwerpunktenergie. Die Kurven stellen Vorhersagen der perturbativen QCD, unterstützt durch das Color Evaporation Model, dar.

enten häufig nicht genügend Energie haben, um ein schweres Quarkpaar zu erzeugen. Quantitative Berechnungen der Produktionswirkungsquerschnitte sind im allgemeinen sehr schwierig, werden aber mit wachsender Quarkmasse zuverlässiger. Deshalb sind Messungen der Produktion von Teilchen mit schweren Quarks besonders interessant.

Die gerade diskutierten Massenabhängigkeiten werden in den folgenden Abbildungen veranschaulicht: Abbildung 47 zeigt alle drei verfügbaren Messungen der Beauty-Produktion von *fixed target* Experimenten (*fixed target*: Strahl trifft auf ein festes Target, wie bei HERA-B), einschließlich des HERA-B-Punktes, als Funktion der Energie des Protonenstrahls. Die Daten werden mit zwei Vorhersagen der perturbativen QCD, die als Kurven mit Fehlerintervallen dargestellt sind, verglichen. Die HERA-B-Messung ist die genaueste der drei Messungen und ist in guter Übereinstimmung mit beiden Vorhersagen.

Abbildung 48 zeigt zusammen mit dem HERA-B Ergebnis eine Zusammenstellung von *fixed target* Messungen des Υ -Wirkungsquerschnitts im Bereich zentraler Rapidität als Funktion der Proton-Nukleon-Schwerpunktenergie (Rapidität ist ein Maß für den Impuls eines erzeugten Teilchens entlang der Strahlrichtung). Die Kurve beschreibt perturbative QCD-Rechnungen, in denen mit Hilfe des *Color Evaporation Models* die Wahrscheinlichkeit, dass produzierte $b\bar{b}$ -Quarkpaare sich zu einem Υ -Meson verbinden, bestimmt wird. Durch Extrapolation des gemessenen Wirkungsquerschnitts auf den gesamten Rapiditätsbereich läßt sich der totale Υ -Produktionswirkungsquerschnitt bestimmen, der sich zu 200 pb bei der HERA-B-Energie ergibt, was nur etwa zwei Prozent des gesamten Beauty-Produktionswirkungsquerschnitts ausmacht.

Abbildung 49 fasst die verfügbaren Daten zur J/ψ -Produktion in Proton-Kern-Streuung als Funktion der

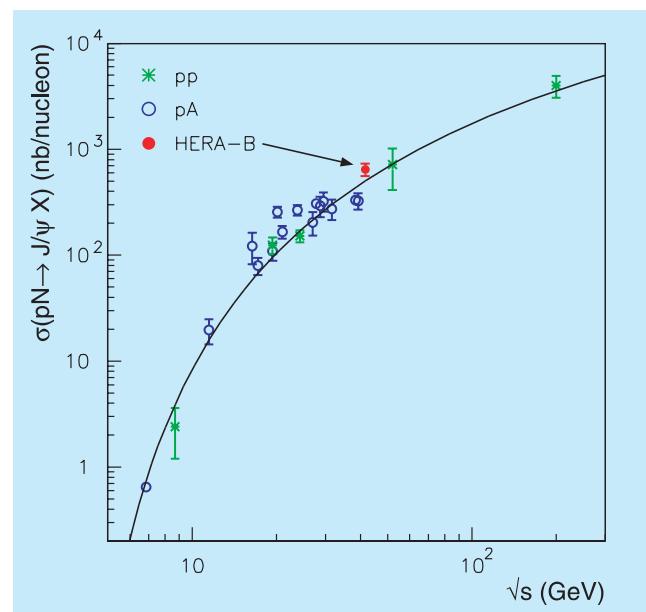


Abbildung 49: Die verfügbaren Messungen des J/ψ -Produktionswirkungsquerschnittes in Proton-Proton (Stern) und Proton-Kern Experimenten (Kreis) als Funktion der Proton-Nukleon-Schwerpunktenergie. Die Kurve stellt die Anpassung von Rechnungen im Rahmen des Nicht-Relativistischen QCD-Modells (NRQCD) an die Daten dar.

Proton-Nukleon-Schwerpunktenergie, einschließlich des HERA-B-Punktes, zusammen. Die Kurve stellt die Anpassung von Rechnungen im Rahmen des Nicht-Relativistischen QCD-Modells (NRQCD) an die Daten dar. Die Kurve beschreibt die Daten einigermaßen gut, allerdings bemerkt man bei näherem Hinsehen, dass die Daten einzelner Experimente innerhalb der von den Experimentatoren angegebenen Fehlern nicht miteinander verträglich sind. Trotzdem kann man den allgemeinen Trend aus diesen Daten entnehmen und der Vergleich mit dem Υ -Wirkungsquerschnitt in Abbildung 48 zeigt, dass das J/ψ -Meson etwa 3000-mal häufiger als das Υ -Meson produziert wird.

Schließlich wird in Abbildung 50 die HERA-B Messung des Wirkungsquerschnittes für die Produktion des $\phi(1020)$ -Mesons, einem gebundenen Zustand von (überwiegend) Strange- und Anti-Strange-Quarks, mit den Ergebnissen von anderen Proton-Proton und Proton-Kern Streuexperimenten verglichen. Der Wirkungsquerschnitt weist darauf hin, dass das $\phi(1020)$ -Meson relativ häufig erzeugt wird: ein $\phi(1020)$ -Meson ist etwa 10000- bis 20000-mal häufiger in einem Ereignis zu finden als ein J/ψ -Meson.

Die Vermessung der Wirkungsquerschnitte für die Produktion von schweren und weniger schweren Hadro-

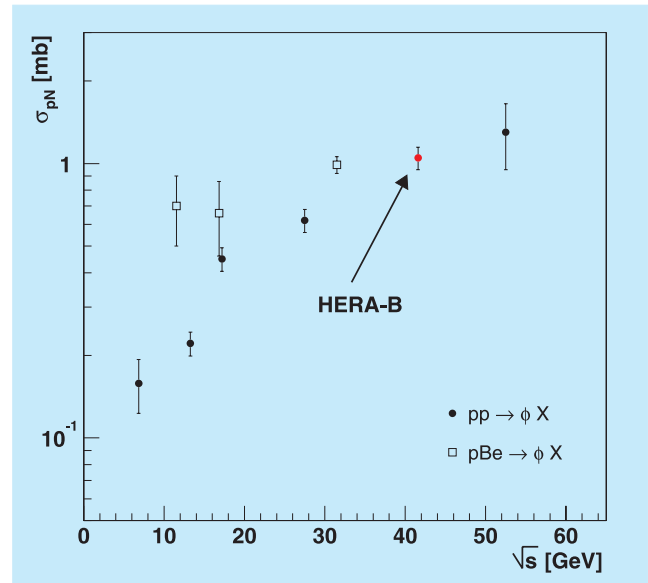


Abbildung 50: Die verfügbaren Messungen des $\phi(1020)$ -Produktionswirkungsquerschnittes in Proton-Kern-Streuung als Funktion der Proton-Nukleon-Schwerpunktenergie.

nen mit dem HERA-B-Experiment wird abgeschlossen sein, wenn die verbleibenden Analysen der Produktion von Charm und Strangeness und von Deuteronen im folgenden Jahr (2006) fertiggestellt werden.

Theoretische Physik

Gruppenleiter: F. Schrempp, T. Riemann, K. Jansen

Die Forschungsfelder der DESY Theorie-Gruppen in Hamburg und Zeuthen, in enger Verzahnung mit den Instituten für Theoretische Physik der Universität Hamburg und der Humboldt-Universität zu Berlin, überdecken die wesentlichen Themata der modernen Teilchenphysik. Eine kontinuierliche Kette spannt sich vom Standardmodell über seine möglichen Erweiterungen bis hin zu Stringtheorien und Kosmologie. Diese Arbeiten werden durch Rechnerentwicklungen und Berechnungen des John von Neumann-Instituts für Computing (NIC) im Bereich der Gitter-QCD ergänzt.

Im Standardmodell stehen Fragen zur Quantenchromodynamik im Vordergrund, korreliert mit der Physik bei HERA und mit nicht-perturbativen Lösungen der Theorie mittels feldtheoretisch analytischer Methoden und numerischer Gitter-Methoden. Andere Aspekte betreffen die Physik der B-Hadronen als Instrument zum Studium von Quarkmischungen und CP-Verletzung. Die Forschungsaktivitäten in der Quantenchromodynamik und im elektroschwachen Sektor des Standardmodells werden als Grundlage zur Suche nach neuen physikalischen Phänomenen stetig auf Präzisionsvorhersagen für LHC und ILC ausgeweitet. Von zentraler Bedeutung für die zukünftige Entwicklung der Hochenergiephysik sind die Analysen von Mechanismen zur Brechung der elektroschwachen Symmetrien, Higgs-Mechanismus und Alternativen.

Ein weites und hoch-aktuelles Feld wird von der Erforschung möglicher physikalischer Szenarien jenseits des Standardmodells gebildet. Zuvorderst steht die Analyse der Supersymmetrie und ihre Verknüpfung mit vereinheitlichten Theorien an der Vereinigungsskala der

drei Wechselwirkungen – oder sogar an der Planck-Skala, an der die Gravitation mit eingebunden wird (Abbildung 51). Theorien zur Neutrino-Physik bieten eine weitere Verbindung zwischen Niederenergie- und Hochenergie-Skalen. Phänomenologische Vorbereitungen zur Lösung dieser grundlegenden Fragestellungen an LHC und ILC sind ein zentraler Aspekt in diesem Feld.

Von theoretisch-physikalisch fundamentaler Bedeutung ist die Entwicklung von Theorien an Vereinigungs- und Planck-Skala, die Erforschung der Gravitation und der all-umfassenden Stringtheorien. Die Erweiterung auf das Studium von Stringtheorien hat in den letzten Jahren neue Akzente im physikalischen Spektrum des Hamburger Theorie-Bereiches gesetzt.

Seit einigen Jahren entwickelt sich eine faszinierende Verbindung zwischen Hochenergiephysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie. Eine gemeinsame Plattform wird gebildet von fundamentalen Fragen zur Natur der dunklen Materie, zum Ursprung des Materie-Überschusses im Universum und zur Natur der hochenergetischen kosmischen Strahlung. Die Suche nach theoretischen

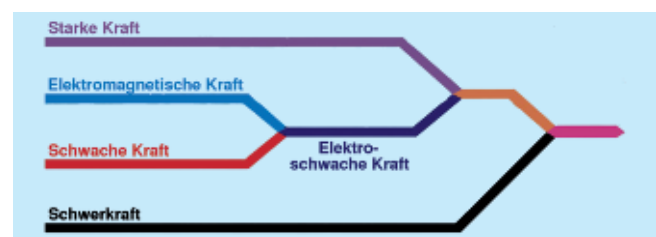


Abbildung 51: Vereinheitlichung der vier elementaren Wechselwirkungen.

tischen wie experimentellen Lösungen dieser Probleme bildet einen hervorragenden Punkt in der Forschung der Theorie-Gruppen.

Aktivitäten in Hamburg

HERA-Physik und QCD

Strukturfunktionen, Saturation und Diffraktion bei HERA

Zu den wichtigsten bei HERA beobachteten Phänomenen gehört das starke Anwachsen der Gluondichte im Proton mit der Kollisionsenergie. Es gibt starke theoretische Argumente dafür, dass dieses Anwachsen bei hinreichend hohen Dichten durch nichtlineare Effekte gebremst wird. Ein kritischer Überblick über die Evidenz einer solchen Partonsaturation in HERA-Daten wurde in [Eur. Phys. J. C43 (2005) 3] präsentiert. Eine theoretische Analyse von Saturationseffekten im Zusammenhang mit dem Odderon der perturbativen QCD ist in [hep-ph/0509270] enthalten.

Im Rahmen der Untersuchung diffraktiver Prozesse bei HERA geht [DESY 05-095] der Frage der Faktorisierung in der diffraktiven Zwei-Jet Produktion nach. Die Berücksichtigung von Rückstreu-Effekten im Anfangszustand reduziert die ansonsten auftretende starke Abhängigkeit von der Skala M_γ , welche den *resolved* vom *direkten* Photonbeitrag separiert.

In [Phys. Rev. D71 (2005) 074020] wurden die theoretischen Grundlagen des weichen Farbaustausches in der Diffraktion untersucht. Die Anwesenheit einer Rapiditätslücke zwischen Target und dem diffraktiven System zwingt das letztere in ein Farbsinglett. Dies wird dadurch erreicht, dass in der Quarkverteilung des Targets durch eine Wilsonlinie zusätzliche Rückstreu-Effekte berücksichtigt werden. Dieser Vielfachaustausch von instantanen Gluonen kann als effektiver Pomeron austausch angesehen werden, wobei dieses Pomeron dann nicht ein Teil des Protons ist,

sondern vielmehr ein dynamischer Effekt der Wechselwirkung. Dieser Mechanismus stellt eine theoretische Basis für den Austausch weicher Gluonen im *soft color interaction* Modell dar, das ursprünglich für die bei HERA beobachteten *rapidity gap* Ereignisse entwickelt worden war und dann später auch auf andere Daten erfolgreich angewendet worden ist.

Die erwähnten weichen Rückstreu-Effekte in der QCD haben sich auch als wichtig für die Erklärung des *jet quenching* erwiesen, das in Schwerionen-Kollisionen bei RHIC beobachtet und als wesentliches Signal für das Quark-Gluon Plasma angesehen wird. In [hep-ph/0512300] wird gezeigt, dass Partonen beim Durchqueren des Quark-Gluon Plasmas im beträchtlichen Maße auch durch die erwähnten Rückstreu-Effekte Energie verlieren können und nicht nur durch den bisher hauptsächlich betrachteten Mechanismus einer durch das Medium induzierten Abstrahlung. Es wurde eine detaillierte Monte Carlo Simulation von Quarks und Gluonen durchgeführt, die in einem harten Subprozess erzeugt und dann durch Vielfach-Wechselwirkung in einem expandierenden relativistischen Medium an Gluonen elastisch gestreut werden. Die Resultate zeigen ein erhebliches *jet quenching*, das einen Großteil des bei RHIC beobachteten Effekts erklären könnte.

Schließlich wurde ein physikalisches Modell für Quark- und Gluon Verteilungen des Protons entwickelt [Phys. Rev. D71 (2005) 094015], in dem das Proton in Meson-Baryon Paare fluktuiert. Dieses Modell beschreibt die bei HERA gemessene Protonstrukturfunktion, und es liefert eine natürliche Erklärung für die beobachteten Quark-Asymmetrien, wie z. B. die Differenz zwischen den \bar{u} - und \bar{d} -Verteilungen und zwischen den Valenz u - und d -Verteilungen. Eine Asymmetrie in den Impulsverteilungen von s - und \bar{s} -Quarks im Nukleon reduziert die *NuTeV Anomalie* soweit, dass sie keinen signifikanten Hinweis mehr auf neue Physik jenseits des Standardmodells liefert.

Exklusive und semi-inklusive Prozesse

Für das detaillierte Studium der Proton-Struktur sind exklusive und semi-inklusive Prozesse von besonderer

Bedeutung: sie gewähren Zugang zu verschiedenen Typen von Partondichten, die komplementäre Information über die Impuls- und Spinverteilung von Quarks und Gluonen enthalten. In exklusiven Prozessen ist der gesamte Endzustand der Reaktion spezifiziert, während in semi-inklusive Prozessen nur ein Teil der Reaktionsprodukte beobachtet wird. In bestimmten, insbesondere bei HERMES relevanten kinematischen Bereichen, können einzelne exklusive Reaktionskanäle einen bedeutenden Teil der semi-inklusive Ereignisrate ausmachen. Die theoretische Interpretation semi-inklusive Daten ist dann problematisch, so dass es wichtig ist, solche Bereiche zu identifizieren. Dafür wurden in der Studie [hep-ph/0506171] systematisch die Wirkungsquerschnitte verschiedener Produktionskanäle abgeschätzt. Dabei wurde gleichzeitig die Sensitivität einzelner exklusiver Kanäle auf die verallgemeinerten Partondichten für verschiedene Quark-Flavours und Gluonen untersucht. In der semi-inklusive und exklusiven Elektron-Proton Streuung gibt es eine große Anzahl von Polarisations-Observablen, die detaillierte Information über die Proton-Spinstruktur enthalten. In der Arbeit [hep-ph/0503023] wurde gezeigt, wie aus der zum Teil sehr komplizierten Polarisations- und Winkelabhängigkeit die physikalisch relevanten Größen extrahiert werden können.

Zu den am wenigsten bekannten Aspekten der Proton-Spinstruktur gehört die Verteilung der Quarkpolarisation *transversal* zur Bewegungsrichtung der Quarks. Insbesondere die räumliche Verteilung dieser Polarisation im Proton ist im Experiment äußerst schwer zugänglich. Die diese Verteilung beschreibenden Matrixelemente sind hingegen gut geeignet für eine Berechnung in der Gitter-QCD. In der Studie [hep-ph/0504175] wurden diese Matrixelemente klassifiziert und ihre allgemeinen Eigenschaften und physikalische Interpretation diskutiert. Erste Gitter-Resultate der QCDSF-Kollaboration [hep-lat/0507001] liefern beachtlich große Polarisations-Effekte in diesem Sektor.

Gitterrechnungen für die Momente verallgemeinerter Partondichten des Pions, insbesondere für seinen elektromagnetischen Formfaktor F_π , wurden in [hep-lat/0509133] präsentiert. Sie schließen die Effekte dynamischer Quarks mit ein und liefern für F_π Resultate

mit relativ kleinen statistischen Fehlern. Wegen des erforderlichen Aufwands müssen diese Rechnungen für unphysikalisch große Pionmassen durchgeführt werden. Naiv lineare Extrapolation der Ergebnisse zur physikalischen Pionmasse liefert gute Übereinstimmung mit den experimentellen Werten von F_π . Eine realistischere Extrapolation muss im Bereich kleiner Pionmassen dynamische Effekte berücksichtigen, die im Rahmen der chiralen Störungstheorie beschrieben werden. Die für die Momente verallgemeinerter Partondichten im Pion notwendigen Rechnungen in der Ein-Schleifen Näherung wurden in [hep-ph/0509330] publiziert.

Fragmentations-Funktionen

Im Rahmen des Partonmodells der QCD wird die inklusive Erzeugung von Hadronen (h) mit Hilfe von Fragmentations-Funktionen (FFn) $D_a^h(x, \mu^2)$ beschrieben. Das Faktorisierungstheorem der QCD sagt für diese Objekte zwei wichtige Eigenschaften vorher, die experimentell überprüft werden können, nämlich Universalität und wohldefiniertes Verhalten in der Skala μ . Im Bereich mittlerer bis großer Impulsbruchteile x des Hadrons h im Mutterparton a wird die μ -Abhängigkeit der FFn durch die DGLAP-Gleichungen beschrieben. FFn beinhalten langreichweitige Effekte der starken Wechselwirkung und können daher nicht im Rahmen der Störungstheorie berechnet werden, sondern müssen, ähnlich wie Partonverteilungen, durch Fits an experimentelle Daten ermittelt werden. Hierfür besonders geeignet sind Daten der e^+e^- -Vernichtung, da diese vergleichsweise kleine Messfehler aufweisen und wegen des leptonischen Anfangszustandes ohne weitere hadronische Unsicherheiten theoretisch interpretiert werden können. Bislang musste allerdings der Nachteil in Kauf genommen werden, dass die drei leichtesten Quarks (u, d, s) durch *flavour tagging* experimentell nicht unterschieden werden konnten, was zu einer erheblichen Unsicherheit in der relativen Gewichtung der entsprechenden FFn führte. Die OPAL Kollaboration veröffentlichte vor kurzem erstmals Tagging-Wahrscheinlichkeiten für leichte Quark-Flavours, dank derer dieser Mangel weitgehend beseitigt werden kann.

te. Durch die Einbeziehung dieser Messergebnisse in eine globale Analyse von Präzisionsdaten der inklusiven Hadronenerzeugung durch e^+e^- -Vernichtung bei PEP, PETRA, TRISTAN, LEP und SLC wurden in nächstführender Ordnung (NLO) FFn für die Hadronen $\pi^\pm, K^\pm, p/\bar{p}$ [DESY 05-022], K_S^0 und Λ [DESY 05-209] extrahiert. Die kürzlich von der PHENIX bzw. STAR Kollaboration bei RHIC gemessenen Transversalimpulsverteilungen der Prozesse $pp \rightarrow (\pi^0, K^0, \Lambda) + X$ stimmen gut mit den entsprechenden, aus den neuen FFn gewonnenen, Vorhersagen überein, im Einklang mit der erwarteten Skalenverletzung und Universalität.

Dieser Formalismus kann auch auf schwere Hadronen, etwa D oder B Mesonen, angewandt werden, sofern deren Masse klein gegenüber der charakteristischen Energieskala der betrachteten Prozesse ist. So wurden in NLO nichtstörungstheoretische FFn für D^0, D^+ und D_s^+ Mesonen sowie für Λ_c^+ Baryonen durch Fits an entsprechende LEP1-Daten der OPAL Kollaboration bestimmt [DESY 05-054]. Mit Hilfe dieser FFn können auch CESR Daten von CLEO, PEP Daten von HSR und PETRA Daten von TASSO erfolgreich beschrieben werden, was einen nichttrivialen Test der Skalenverletzung darstellt.

Im Bereich kleiner x -Werte überwiegt die Fragmentierung des Gluons, und die μ -Abhängigkeit weicht in charakteristischer Weise von der DGLAP-Evolution ab. Dort findet die modifizierte Näherung durch führende Logarithmen (MLLA) Anwendung. Auf der Suche nach einem vereinheitlichten Evolutionsformalismus für den gesamten x -Bereich wurde zunächst die doppellogarithmische Näherung (DLA), welche die am stärksten singulären Soft-Gluon-Logarithmen aufsummiert, konsistent in die übliche DGLAP-Evolution in führender Ordnung (LO) eingebettet [DESY 05-047]. Interessanterweise enthält dieser Zugang bereits die MLLA, da die betreffenden Einzellogarithmen automatisch aufsummiert werden. Tatsächlich verbessert er die MLLA, da letztere im Grenzfall $x \rightarrow 1$ zusammenbricht und die Quark-Freiheitsgrade unterdrückt, während der neue Zugang frei von diesen Mängeln ist. Eine zusätzliche Verbesserung kann durch die systematische Berücksichtigung von Hadronmasseneffekten erzielt werden [DESY 05-048]. Um diesen Zugang

in der Praxis zu testen, wurde ein globaler Fit an alle vorhandenen e^+e^- -Daten der inklusiven Erzeugung leichter geladener Hadronen durchgeführt, wobei in einem zweiten Schritt auch Gluon-Jet-Daten der OPAL Kollaboration berücksichtigt wurden, um eine genauere Bestimmung der Gluon-FF zu erhalten, die in LO sonst nur durch Effekte der Evolution eingeschränkt wird.

Die inklusive Hadroproduktion schwerer Hadronen ($h = D, B$) im Übergangsbereich zwischen kleinen ($0 \leq p_T \lesssim m_h$) und großen ($p_T \gg m_h$) Transversalimpulsen wurde in NLO im Rahmen eines theoretischen Formalismus behandelt, der einerseits Massenkorrekturen vollständig berücksichtigt und andererseits die Universalität und Skalenverletzung der FFn auf der Grundlage des Faktorisierungstheorems gewährleistet [DESY 05-030]. Theoretische Vorhersagen für die inklusive Erzeugung von $D^0, D^\pm, D^{*\pm}$ und D_s^\pm Mesonen in $p\bar{p}$ -Stößen am Tevatron stimmen innerhalb der Fehler mit kürzlich veröffentlichten Messdaten der CDF Kollaboration überein [DESY 05-146].

Produktion von Charmonium

Die Faktorisierungshypothese der nichtrelativistischen QCD (NRQCD) sagt die Existenz so genannter Farboktettprozesse in der Natur vorher, d. h. schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Andererseits liefern im Grenzfall hoher Energien partonische Subprozesse der Hadroproduktion mit t-Kanal-Gluonaustausch führende Beiträge. Dabei kann 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 Gluodynamik wird, zumindest zu einem gewissen Grad, durch die BFKL-Gleichung beschrieben. Der Frage, ob die derzeit unbefriedigende Beschreibung der Daten zur Charmoniumerzeugung 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 nachge-

gangen, indem zunächst die relevanten nichtstörungstheoretischen NRQCD-Matrixelemente durch einen kombinierten Fit an Tevatron-Daten zur direkten bzw. prompten Hadroproduktion von J/ψ -Mesonen extrahiert wurden. Zur Überprüfung der NRQCD-Faktorisierung wurden mit diesen Matrixelementen 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].

LHC Physik

Viele Wissenschaftler des DESY sowie des II. Theoretischen Instituts der Universität haben am HERA-LHC Workshop teilgenommen und z. T. auch in dessen Organisation mitgewirkt. Im Abschlussbericht [DESY PROC-2005-01] finden sich zahlreiche wissenschaftliche Beiträge zu den in diesem Workshop untersuchten Themen, die hier aus Platzgründen nicht im Detail aufgeführt werden können.

Darüber hinaus wurden weitere Untersuchungen zur zukünftigen LHC-Physik durchgeführt: in [DESY 05-088] und in [DESY 05-10] wurden theoretische Aspekte der BFKL Dynamik am LHC untersucht, und in [hep-ph/0507317] werden im NLO-BFKL Formalismus Wirkungsquerschnitte für die W Produktion berechnet. Als theoretische Grundlage der beim LHC zu erwarteten Multiparton-Wechselwirkungen werden in [Eur. Phys. J. C42 (2005) 53] die so genannten AGK Regeln systematisch untersucht.

Instantonprozesse

Instantonen stellen einen grundlegenden nichtstörungstheoretischen Aspekt von Yang-Mills Eichtheorien und speziell der QCD dar. Trotz zahlreicher, überzeugender theoretischer Hinweise auf die Existenz und tiefe Bedeutung von Instantonen steht ihr direkter experi-

menteller Nachweis aber noch immer aus. Aufbauend auf ausgiebigen theoretischen Untersuchungen über die Rate und Signatur Instanton-induzierter Prozesse in der tiefinelastischen ep -Streuung, sowie auf bisherigen Resultaten der H1 und ZEUS Experimente wurde die wichtige Frage nach der Beobachtbarkeit von Instanton-Prozessen beim LHC systematisch angegangen [DESY 05-125]. In beiden HERA-Experimenten konnte bereits demonstriert werden, dass sich die experimentelle Empfindlichkeit durchaus in die Nähe der in der DESY Theorie erarbeiteten Vorausagen steigern lässt. Am LHC geht es zum ersten Mal um Instanton-Prozesse, bei denen die für eine Anwendung der Instanton-Störungstheorie benötigte Virtualität erstens zeitartig ist und zweitens im Endzustand statt (wie bei HERA) im Anfangszustand auftritt. Die Virtualität eines Endzustands-Quarks wird durch den Nachweis eines abgestrahlten Photons mit hoher Transversalenergie oder eines W -Bosons erreicht. Es ist dabei von besonderem Interesse, dass sich im idealisierten Fall nur eines masselosen Quarkflavours der führende Instanton-Subprozess am LHC, $g + g \rightarrow q_R + \bar{q}_R^* + \text{Gluonen}$, durch Kreuzen den relevanten Subprozess bei HERA ergibt: $q_L^* + g \rightarrow q_R + \text{Gluonen}$. Beim LHC erwartet man aber eine wesentlich höhere Anzahl von Endzustandsgluonen in einem Instantonprozess als bei HERA (ca. 3.5 pro Ereignis). Diese Tatsache wird den typischen *Feuerball*-Charakter von Instantonereignissen bedeutend verstärken.

Gittereichtheorie

Im Bereich Gittereichtheorie konzentrierten sich die Aktivitäten auf Simulationen der QCD mit leichten dynamischen Quarks, auf die Physik der K - und B -Mesonen und die Untersuchung der spontanen chiralen Symmetriebrechung.

Gitter-QCD mit leichten Quarks

In enger Kooperation mit der Elementarteilchengruppe des John von Neumann-Instituts am DESY, Standort Zeuthen, wurde eine neue Formulierung der Gitter-

QCD, die so genannten Twisted-Mass-Fermionen einem Test im Falle von vier Quark-Flavour unterzogen. Hierbei werden das Up- und das Down-Quark als massenentartetes Duplett behandelt, während das Strange- und das Charm-Quark unterschiedliche Massen erhalten. Es mussten für diesen Fall spezielle Algorithmen entwickelt werden [DESY 05-085], die sich in der Praxis sehr bewährt haben.

Ähnlich wie im Fall von nur zwei massenentarteten Quark-Flavour wurde das Phasendiagramm untersucht und die Punkte im Phasendiagramm lokalisiert, bei denen der Phasenübergang erster Ordnung die Simulationen nicht beeinträchtigt. Weiter konnte gezeigt werden, dass man tatsächlich die Parameter der Twisted-Mass Gitter-QCD Wirkung so einstellen kann, dass die Massen der Mesonen nahe bei ihren physikalischen Werten herauskommen. Dies war eine offene Frage bei Beginn des Projektes und die hier durchgeführten Rechnungen bilden somit eine wichtige Grundlage für zukünftige Rechnungen in der physikalisch realistischen Situation, dass man das Strange- und das Charm-Quark in die Simulation mit einbezieht.

Renormierung von Vier-Quarkoperatoren

Im Standardmodell führt die Operatorproduktentwicklung der effektiven schwachen Wechselwirkung auf diverse Vier-Quarkoperatoren. Beispiele hierfür sind die $\Delta S = 2$ and $\Delta B = 2$ Operatoren, die Oszillationen neutraler Kaonen und B-Mesonen beschreiben. Die Berechnung ihrer hadronischen Matrixelemente durch Simulationen der Gitter-QCD mit Wilson-Quarks erzeugt zusätzliche Terme mit endlichen Mischungskoeffizienten aufgrund der Brechung der chiralen Symmetrie. Diese additive Operatormischung kann jedoch durch Einführen eines *twisted* Massenterms vermieden werden, welcher eine exakte Abbildung der phänomenologisch relevanten, paritätserhaltenden Operatoren auf entsprechende paritätsverletzende Operatoren erlaubt. Man kann zeigen, dass letztere ausschließlich multiplikativ renormiert werden. In [DESY 05-070] wurde das Schrödingerfunktional der QCD benutzt, um eine Familie von Renormierungsschemata im endlichen Volumen für die relevanten Operatoren der Kaon-Mischung zu

definieren und die Beziehung zum Standard-Schema perturbativ zu berechnen. In [DESY 05-156] wurde diese Rechnung auf die Mischung von B-Mesonen erweitert, wobei das schwere Quark in der statischen Näherung betrachtet wurde. Diese Arbeiten bilden die Grundlagen für künftige nicht-perturbative Berechnungen der skalenabhängigen Renormierung dieser Operatoren.

Chirale Symmetriebrechung

Die spontane Brechung der chiralen Symmetrie in der QCD wird durch das chirale Kondensat Σ parametrisiert. In einer Studie mit Ginsparg-Wilson Fermionen in der Valenzquarknäherung [DESY 05-129] wurde die zu Σ zugehörige Renormierungskonstante der skalaren Dichte für vier verschiedene Gitterabstände bestimmt und der Kontinuumslikes der renormierten Größe gebildet. Diese Rechnung stellt die erste, konzeptionell saubere Bestimmung dieser Größe im Kontinuumslikes der quenched QCD dar. Weiterhin ergab die Kontinuumsextrapolation der Kaonzerfallskonstante und der Vektormesonmasse, dass nicht-perturbativ renormierte Größen für Ginsparg-Wilson Fermionen sehr kleine Gitterartefakte aufweisen.

Ursachen der $\Delta I = 1/2$ Regel

Durch den Vergleich der Übergangsamplituden für den Fall eines unphysikalisch leichten Charm-Quarks ($m_c = m_u$) mit der physikalischen Situation wurde die Rolle des Charm-Quarks für die $\Delta I = 1/2$ -Regel in $K \rightarrow \pi\pi$ Zerfällen untersucht, und es wurde studiert, ob seine große Masse 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 05-198]. Ein wesentliches Element der Rechnung 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 effektiven Kopplungskonstanten in unmittelbarer Nähe zum chiralen Limes zu bestimmen, und so die systematischen Effekte aufgrund langer chiraler Extrapolationen zu vermeiden. Die Resultate implizieren signifikante nicht-perturbative Beiträge zur $\Delta I = 1/2$ -Regel für den Fall eines leichten Charm-Quarks, können jedoch den experimentell beobachteten Wert quantitativ nicht erklären.

Spin-abhängiges Potenzial

Die spin-abhängigen Korrekturen zum statischen Quarkpotenzial sind von phänomenologischem Interesse um die Fein- und Hyperfeinaufspaltung des Spektrums schwerer Quarkoniumzustände in *ab initio* Rechnungen zu bestimmen. Diese Korrekturen werden durch Korrelatoren des Feldstärketensors beschrieben, die in der confinement-Phase der SU(3) Gittereichtheorie in der quenched Näherung betrachtet wurden. Hierzu wurden geeignete Korrelationsfunktionen von Polyakov-Loops unter Verwendung eines so genannte Multi-Level-Algorithmus berechnet, welcher eine außerordentlich hohe statische Präzision in der Bestimmung der Korrekturen zum Potenzial bei mittleren Distanzen erlaubt [DESY 05-192].

B-Physik

Theoretische Untersuchungen zur Physik schwerer Quarks sind ein wesentlicher Bestandteil der seit einigen Jahren in der Theorie-Gruppe und am II. Institut für theoretische Physik der Universität Hamburg durchgeführten Arbeiten. Im Hinblick auf die erfolgreich laufenden Experimente an B-Fabriken wurden die seltenen B-Zerfälle in B-Mesonen Übergängen untersucht und die quantitative Bestimmung der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix mit besonderer Aufmerksamkeit verfolgt.

Die seltenen Zerfälle $B \rightarrow X_d \gamma$ und $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$ liefern wichtige Information über das CKM Matrixelement V_{td} . Die erforderlichen theoretischen Untersu-

chungen sind in der Theorie-Gruppe gemacht worden. Der Zerfall $B \rightarrow X_d \gamma$ ist experimentell schwierig nachweisbar, was auf die niedrige Zerfallsrate und sehr harten experimentellen Untergrund zurückzuführen ist. Die exklusiven Zerfälle $B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma$ sind aber im Jahr 2005 durch das Experiment BELLE nachgewiesen worden [hep-ex/0506079]. Das gemessene Zerfallsverhältnis $\mathcal{B}(B \rightarrow (\rho, \omega) \gamma) = (1.32_{-0.31}^{+0.34} (\text{stat.})_{-0.09}^{+0.10} (\text{syst.}))$ ist mit den auf dem Standardmodell basierten theoretischen Abschätzungen in sehr guter Übereinstimmung. Der extrahierte Wert vom Verhältnis der CKM Matrixelementen $|V_{td}/V_{ts}| = 0.199_{-0.025}^{+0.026} (\text{exp.})_{-0.015}^{+0.018} (\text{theor.})$ ist mit dessen indirekter Abschätzung in sehr gutem Anklang und liefert wichtige Information über das CKM Unitaritätsdreieck.

Der seltene Zerfall $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ und die exklusiven Zerfälle $B \rightarrow (K, K^*) \ell^+ \ell^-$ sind als Präzisionstest des Standardmodells in Flavour-Übergängen theoretisch abermals untersucht worden. Diese Zerfälle sind auch für die Suche der Physik jenseits des Standardmodells gut geeignet, brauchen aber eine präzise Abschätzung der QCD-basierten dynamischen Aspekte. Diese Aspekte wurden mit Hilfe der so genannten *Soft Collinear Effective Theorie* (SCET) untersucht. Diese Theorie erlaubt es, die nicht-störungstheoretischen Unsicherheiten in B-Mesonen Zerfällen zu reduzieren. Vom besonderen Interesse ist die so genannte Vorwärts-Rückwärts (VR) Asymmetrie in den Zerfällen $B \rightarrow (X_s, K^*) \ell^+ \ell^-$. Eine SCET-basierte Untersuchung des Zerfalls $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ wurde im Jahr 2005 angefertigt und die Ergebnisse wurden Anfang Januar 2006 veröffentlicht [DESY 06-002]. Die erste Messung der VR-Asymmetrie in $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ wurde von BELLE erst im Jahr 2005 veröffentlicht; die integrierte Asymmetrie ist mit den Standardmodell-basierten Abschätzungen in fairer Übereinstimmung, die jetzigen Daten erlauben jedoch noch keine präzise Untersuchung des Standardmodells.

Collider-Physik

Da in den nächsten beiden Jahren die Inbetriebnahme und erste Daten am CERN-Protoncollider LHC

zu erwarten sind, wird die Hochenergiephysik in naher Zukunft die physikalischen Strukturen im TeV-Energiebereich aufdecken können. Insbesondere ist ein eindeutiger Nachweis oder der Ausschluss des Higgs-Bosons möglich, das den Mechanismus für die Massenerzeugung der Teilchen im Standardmodell manifestiert. Supersymmetrische Partnerteilchen oder Signale alternativer Modelle der elektroschwachen Symmetriebrechung sind, sofern sie existieren, ebenfalls beobachtbar und detaillierten Messungen zugänglich.

Ein genaueres Verständnis dieser neuen Wechselwirkungen erfordert die Ergänzung der LHC-Resultate um Präzisionsmessungen, wie sie nur am geplanten TeV e^+e^- -Linearcollider ILC durchgeführt werden können. Von großer Bedeutung ist dafür die Möglichkeit, am ILC die Elektron- und Positron-Strahlen polarisieren zu können, wie umfassend in [DESY 05-059] dokumentiert. Durch die Kombination aller so an beiden Collidern gewonnenen Daten lässt sich die Struktur der Theorie exakt bestimmen und gegebenenfalls bis zur Planck-Skala extrapolieren, bei der sich auch die Gravitation in eine fundamentale und universelle Theorie einfügt.

Elektroschwache Wechselwirkung

Unabhängig von der speziellen Realisierung des Higgs-Mechanismus ist sein Effekt auf die Streuung massiver W- und Z-Bosonen, deren Amplitude im Standardmodell durch den Austausch eines Higgs-Bosons stark unterdrückt wird, um die Unitarität der Theorie sicherzustellen. Alternativ müsste bei Abwesenheit des Higgs-Bosons eine neue starke Wechselwirkung beobachtet werden, die sich in der Energieabhängigkeit der Streu-Amplituden bemerkbar macht und zu neuen Resonanzen führen kann.

Derartige Resonanzen sind möglicherweise am LHC direkt zu beobachten. Ein indirekter Nachweis durch Einfluss auf das Schwellenverhalten der W-Boson Streuung am ILC würde eine unabhängige Bestimmung der Resonanzparameter erlauben, in denen sich die Struktur der zugrunde liegenden neuen Wechselwirkung widerspiegelt [DESY-05-115].

Supersymmetrie

Supersymmetrische Modelle fügen den bekannten Teilchen des Standardmodells Partner mit unterschiedlichem Spin hinzu. Sie erlauben eine natürlich erscheinende Erklärung des Higgs-Mechanismus und bereiten den Pfad der Teilchenphysik zur Gravitation. Einige der Superpartner sollten Massen an der elektroschwachen Skala besitzen und am LHC wie auch am ILC beobachtbar sein.

Da im Prinzip der Zerfall des Protons durch Austausch supersymmetrischer Teilchen ermöglicht wird, ist eine diskrete Symmetrie postuliert worden, R-Parität, die den schnellen Proton-Zerfall verbietet. In diesem Falle ist der leichteste Superpartner stabil und kann damit eine Komponente der beobachteten kalten dunklen Materie im Universum bilden. Die Produktion der Superpartner an LHC und ILC und das genaue Studium ihrer Wechselwirkungen führt zu einer quantitativen Vorhersage der kosmologischen Dichte dunkler Materie und stellt so eine enge Verbindung zwischen Teilchenphysik und Kosmologie her.

SUSY-Neutrino-Physik

Neutrinomassen und -mischungen, falls sie durch den so genannten See-saw-Mechanismus verursacht werden, sind eine Folge von Wechselwirkungen, die sich bei extrem hohen Energieskalen unter Mitwirkung sehr schwerer rechts-händiger Neutrinos abspielen. In supersymmetrischen Modellen gibt es neben den Standardmodell-Neutrinos auch deren supersymmetrische skalare Partner, Sneutrinos. Diese Teilchen eröffnen einen unabhängigen Zugang zu diesem hohen Energiebereich, der nicht nur für die postulierte Vereinigung aller Eichwechselwirkungen bei etwa 10^{16} GeV, sondern vermutlich auch für die Leptogenese und den auf diese Weise erzeugten Materieüberschuss im Universum relevant ist.

Sneutrinos haben möglicherweise ausschließlich Zerfälle in unsichtbare Endprodukte. Am ILC gibt es jedoch die Möglichkeit, Sneutrinomassen aus Energiespektren in Zerfällen der supersymmetrischen Partner

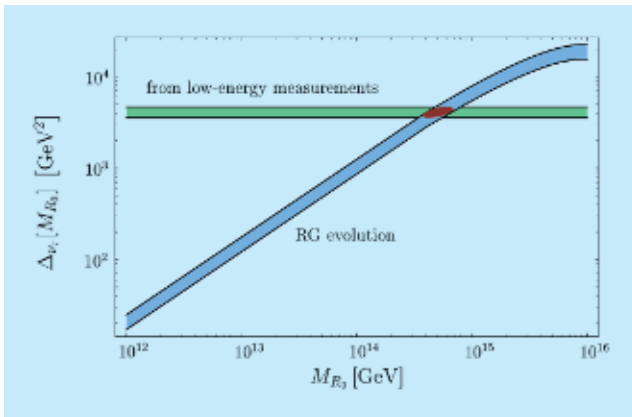


Abbildung 52: Reduzierte Massenverschiebung Δ_{ν_τ} der Tau-Sleptonen und -Sneutrinos und Bestimmung der Massenskala der rechtshändigen Neutrinos.

der W-Bosonen zu bestimmen. Ein supersymmetrisches Vereinigungs-Szenario mit universellen Massenparametern vorausgesetzt, lässt sich die Massenskala der rechtshändigen Neutrinos (Abbildung 52) selbst im Bereich der Vereinigungsskala von 10^{16} GeV bestimmen [DESY 05-241].

Tau-Sleptonen

Eine wichtige Rolle in supersymmetrischen Modellen, die vor allem für die Physik dunkler Materie wesentlich ist, spielen die skalaren Tau-Sleptonen, die Partner des Tau-Leptons. Während die Massen in Kaskaden-Zerfällen am LHC und in der Paarproduktion am ILC leicht analysiert werden können, ist die experimentelle Bestimmung ihrer Wechselwirkung mit den Higgs-Feldern, gemessen durch den so genannten A-Parameter, sehr schwierig.

Einen Zugang zu dieser Größe bilden Zerfälle von schweren SUSY-Higgs-Bosonen in Paare von Tau-Sleptonen. Schwere Higgs-Bosonen werden ihrerseits paarweise am ILC erzeugt. Die Messung erfordert eine genaue Ereignisanalyse der Zerfälle, mit deren Hilfe der gesuchte A-Parameter schließlich gemessen werden kann [DESY 05-150].

Dunkle Materie

Ein populärer Kandidat für den Hauptbestandteil der kalten dunklen Materie ist, wie oben ausgeführt, das leichteste Neutralino, Partner von Photon, Z-Boson und neutralen Higgs-Bosonen in supersymmetrischen Theorien. Andere physikalisch attraktive Kandidaten sind das Gravitino und das Axino, die Superpartner des Gravitons und des Axions. Im Gegensatz zum Neutralino haben Gravitino und Axino nur extrem schwache Wechselwirkungen mit anderen Teilchen. Eine entscheidende Rolle für den experimentellen Nachweis spielt dann die Beobachtung des zweit-leichtesten Super-Teilchens im Detektor, das in vielen Modellen ein quasi-stabiles Tau-Slepton, der bereits oben erwähnte Superpartner des Tau-Leptons, ist.

Dies führt zu der sehr interessanten Möglichkeit, das Gravitino oder das Axino in Experimenten am LHC und ILC zu entdecken und Masse und gravitative Kopplungsstärke zu bestimmen [DESY 05-006, DESY 05-111].

Standards und Simulationen

Die umfassende Bestimmung aller Wechselwirkungsparameter des minimal-supersymmetrischen Standardmodells, oder gar einer Erweiterung davon, ist ein kompliziertes Problem, das nur in der Kombination einer Vielzahl von Beobachtungen am LHC und ILC gelöst werden kann (vergleiche [DESY 05-240]). In diesem Falle schlägt die Extrapolation der fundamentalen Parameter zu hohen Energieskalen eine Brücke zu den physikalischen Mechanismen, die gleichzeitig für die Entwicklung des frühen Universums, die Strukturbildung und die Erzeugung der sichtbaren wie der dunklen Materie verantwortlich sind. Unverzichtbar ist dafür eine gemeinsame Plattform in der Definition der Modelle, ihrer Parameter und experimentellen Standards.

Mit der SPA-Initiative (*Supersymmetry Parameter Analysis*), die von DESY ausging und an der sich weltweit eine große Zahl der mit Supersymmetrie-Phänomenologie befassten Theoretiker und Experimentatoren be-

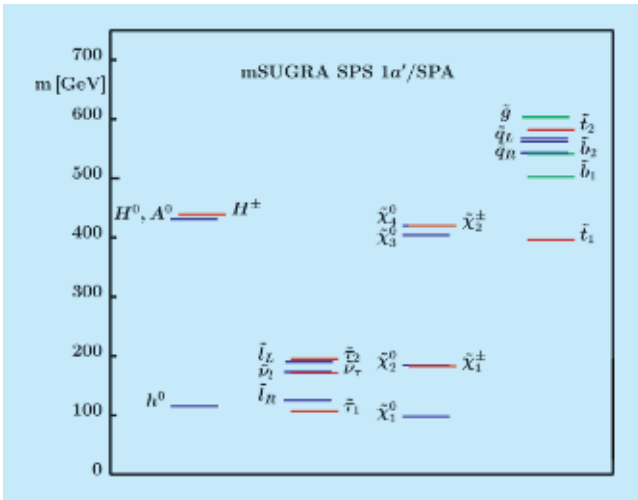


Abbildung 53: Spektrum des MSSM-Referenzszenarios SPS1a'.

teilt, wird eine solche Plattform geschaffen. Das zugehörige Dokument [DESY 05-242] definiert gemeinsame Schemata für die theoretische wie experimentelle Analyse, beschreibt notwendige und wünschenswerte zukünftige Projekte und enthält ein Referenz-Szenario SPS1a', das die Kenntnis über Standardmodell-Präzisionsobservablen, astrophysikalische Beobachtungen und plausible Supersymmetrie-Brechungsszenarien zusammenführt (Abbildung 53).

Supersymmetrie-Prozesse an Collidern wie LHC und ILC sind von hoher Komplexität. An die Stelle einfacher Paarproduktion von neuen Teilchen, wie sie in der Vergangenheit charakteristisch war, treten Vielteilchenprozesse, die lange Zerfalls-Kaskaden enthalten und über einem komplizierten Untergrund aus Standardmodell- und anderen SUSY-Prozessen zu identifizieren sind. Zur Simulation dieser Prozesse sind neue Ereignisgeneratoren geschaffen worden, darunter das Softwarepaket WHIZARD, dessen Implementierung der Supersymmetrie in umfangreichen Vergleichstests mit zwei unabhängig entwickelten Generatoren verifiziert wurde und das erstmals Studien von virtuellen Teilcheneffekten in SUSY-Vielteilchen-Prozessen am LHC und ILC ermöglicht [DESY 05-068, DESY 05-196].

Neutrino-Physik und Kosmologie

Wechselwirkungen schwerer Majorana-Neutrinos in der thermischen Phase des frühen Universums können die Ursache für die heute beobachtete Materie im Universum sein. Dieser Mechanismus der *Leptogenese* führt zu Vorhersagen für die Massen der leichten Neutrinos sowie ihrer schweren *Seesaw*-Partner. Im einfachsten Fall der *thermischen Leptogenese* erhält man außerdem eine untere Schranke an die maximale Temperatur im frühen Universum, die zu starken Einschränkungen an die Natur der dunklen Materie führt. Konventionelle Neutralinos sind mit thermischer Leptogenese nicht vereinbar, während Gravitinos mit Massen im Bereich von 10 GeV bis 100 GeV oder Axionen erlaubt sind [DESY 05-031]. Eine quantitative Analyse des *Seesaw*-Mechanismus, insbesondere auch der Schranken an Neutrinomassen durch die Leptogenese, erfordert die Einbeziehung von Quantenkorrekturen für Massen, Mischungen und CP-Phasen. Die entsprechenden Renormierungsgruppengleichungen wurden numerisch und analytisch im Detail studiert [DESY 05-013]. Neben der Baryogenese sind Neutrinos auch für die Nukleosynthese und die Strukturbildung im frühen Universum von entscheidender Bedeutung, wogegen ihr Beitrag zur Energiedichte im Universum heute vernachlässigbar klein ist [DESY 05-076].

Moduli-Felder sind im Rahmen von Stringtheorien interessante Kandidaten für das Inflatonfeld. Dabei müssen höhere Ordnungen im String-Parameter α' berücksichtigt werden. Ein entsprechendes Inflationsmodell, das mit den Daten der WMAP-Kollaboration kompatibel ist, wurde konstruiert [DESY 05-118]. Für den spektralen Index ergibt sich dabei die Vorhersage $n_s = 0.93$.

Hochenergetische Photonen, Nukleonen und Neutrinos aus dem Kosmos eröffnen ein neues Fenster für die Astrophysik, die Teilchenphysik und die Kosmologie [DESY 05-166]. Als Beispiel für die fruchtbare Zusammenarbeit von Teilchenphysik und Astrophysik in diesem Zusammenhang mag hier eine Vorhersage des Neutrinoflusses bei Energien oberhalb 10^8 GeV gelten, basierend auf der wohlbegründeten Annahme,

dass die beobachteten kosmischen Strahlen in diesem Energiebereich Protonen extragalaktischen Ursprungs sind [DESY 05-042]. Demnach sollten die unter Mitwirkung von DESY betriebenen Neutrinooteleskope AMANDA-II und IceCube genügend Sensitivität besitzen, um zum ersten Mal Neutrinos von wahrhaft extragalaktischem Ursprung nachzuweisen – seien es Neutrinos, welche im Plasma in der Nähe von aktiven galaktischen Kernen erzeugt wurden, oder seien es so genannte kosmogene Neutrinos, welche durch inelastische Streuprozesse von kosmischen Protonen mit Photonen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung erzeugt wurden. In der Tat, diese extragalaktischen kosmischen Neutrinos können als diagnostische Werkzeuge für die Herkunft und den Beschleunigungsmechanismus der hochenergetischen kosmischen Strahlung dienen.

Die kosmogenen Neutrinos könnten auch eine wichtige Rolle für die Beobachtung an Luftschauerdetektoren, wie etwa das neue Pierre Auger Observatory, spielen. Insbesondere im Fall, dass der Neutrino-Nukleon Wirkungsquerschnitt oberhalb 10^{11} GeV stark wird – sei es durch elektroschwache Instantoneffekte innerhalb oder durch TeV-Gravitation/TeV-String Effekte außerhalb des Standardmodells – könnten die rätselhaften kosmischen Strahlen im Höchstenergiebereich eher Neutrinos als Protonen sein [DESY 05-100, 05-236].

Während die obigen Schlussfolgerungen schon mit dem zuvor diskutierten nahezu garantierten minimalen extragalaktischen Neutrinofluss möglich sind, benötigt eine Detektion der resonanten Annihilation von kosmischen Neutrinos mit den Urknall-Hintergrundneutrinos in Z-Bosonen einen Fluss, welcher zu noch höheren Energien reicht [DESY 05-045]. Als mögliche Quellen kommen hiernach topologische Defekte, wie etwa kosmische Strings, oder quasi-stabile ultraschwere Teilchen in Betracht [DESY 05-166]. Im günstigsten Falle ist der Neutrinofluss so groß, dass die höchstenergetischen Strahlen in der Tat Protonen vom assoziierten hadronischen Zerfall der Z-Bosonen sind. Dann sollte man einen Überschuss von Ereignissen aus der Richtung des Virgo Galaxienhaufens sehen [DESY 05-053], der von der gravitativen Anhäufung der Urknallneutrinos in

dem entsprechenden Halo von kalter dunkler Materie herrührt [DESY 05-079].

In vielen vereinheitlichten Theorien werden sehr leichte und extrem schwach wechselwirkende Teilchen jenseits des Standardmodells vorhergesagt. Ein bekanntes Beispiel ist das Axion, welches als Pseudo-Nambu-Goldstone-Boson in Modellen auftritt, in denen das starke CP-Problem durch Einführung einer neuen, spontan gebrochenen Symmetrie gelöst wird. Kürzlich hat die italienische PVLAS Kollaboration Hinweise auf eine Rotation der Polarisation von Laserphotonen nach Durchgang durch ein starkes transversales magnetisches Feld gefunden. Diese Rotation könnte durch die Produktion eines leichten pseudoskalaren oder skalaren Teilchens verursacht sein [DESY 05-229]. In [DESY 05-224] wurde darauf hingewiesen, dass hochenergetische Freie-Elektronen-Laser (FEL) – wie etwa der VUV-FEL an der TESLA Test Facility, LCLS am SLAC, oder der europäische Röntgenlaser XFEL – Photon-Axion-Oszillationsexperimente erlauben, bei denen der Parameterbereich von PVLAS in kurzer Zeit geprobt werden könnte. In der Tat, die dazu nötigen Magnete sind bei DESY schon vorhanden, so dass eine erste Messung am VUV-FEL schon bald in Angriff genommen werden könnte.

Vereinheitlichte Theorien

Theorien, die elektroschwache und starke Wechselwirkung aus einer vereinheitlichten Theorie (GUT) ableiten, gehören zu den am besten motivierten Erweiterungen des Standardmodells. Die Vereinigung der Eichkopplungen weist dabei auf Supersymmetrie bei der elektroschwachen Skala von 100 GeV hin. Im Hinblick auf die notwendige Brechung der GUT-Symmetrie ist die Einbettung des Standardmodells in eine höher-dimensionale Supergravitationstheorie, und darüber hinaus eine Stringtheorie theoretisch attraktiv. Von besonderem Interesse sind phänomenologische Implikationen dieser Erweiterungen des Standardmodells. Alle diese Fragenkomplexe wurden in einer Reihe von Publikationen untersucht.

Das supersymmetrische Massenspektrum wurde in einem Orbifold-GUT-Modell mit Eichgruppe $SO(10)$ berechnet, das bei DESY entwickelt wurde. Für die Supersymmetriebrechung wurde dabei der Mechanismus der *Gaugino-Mediation* angenommen [DESY 05-238]. Als leichtestes Super-Teilchen (LSP) ergibt sich das Gravitino mit einer Masse oberhalb von 10 GeV [DESY 05-089]. Das nächst leichteste Super-Teilchen (NLSP) kann, abhängig von der Higgs-Masse, ein skalares Tau-Lepton, ein skalares Neutrino oder auch ein Neutralino sein, was zu sehr unterschiedlichen Signaturen in Collider-Experimenten führt. Orbifold-GUT-Modelle treten als Zwischenstufe in Orbifold-Kompaktifizierungen der heterotischen Strings auf [DESY 05-260]. Als Resultat einer langwierigen Suche wurde dabei zum ersten Mal ein String-Modell mit Eichgruppe und Teilchenspektrum des supersymmetrischen Standardmodells gefunden [DESY 05-222]. Zwei Quark-Lepton-Generationen sind an Fixpunkten mit GUT-Symmetrie $SO(10)$ lokalisiert, die dritte Generation besteht aus *Bulk-Feldern* (Abbildung 54). Die Eigenschaften dieses Modells werden gegenwärtig weiter untersucht.

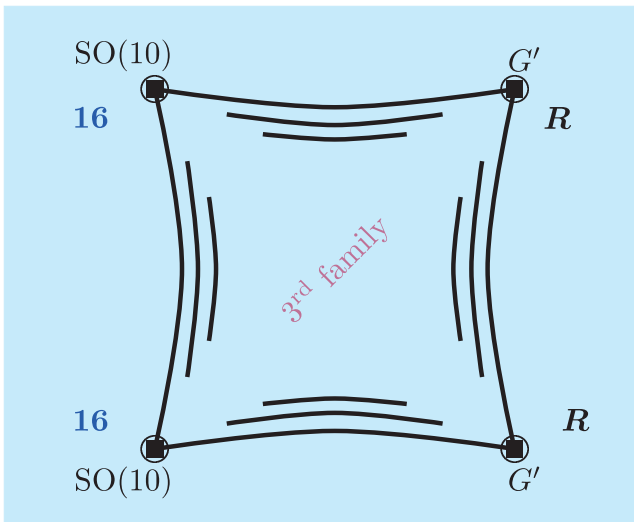


Abbildung 54: Ein 2+1-Familien-Modell. Zwei Quark-Lepton-Familien sind an Fixpunkten mit GUT-Symmetrie $SO(10)$ lokalisiert.

Das Massenspektrum supersymmetrischer Theorien hängt entscheidend vom Mechanismus der Supersymmetriebrechung ab. Sehr große Massen im TeV Bereich erhält man im KKL-Modell, das durch die Moduli-Stabilisierung in String-Kompaktifizierungen motiviert ist [DESY 05-052, DESY 05-112]. Stark eingeschränkt wird die erlaubte Supersymmetriebrechung durch Effekte der *Flavour-Verletzung* im Quark- und im Lepton-Sektor [DESY 05-023]. Die theoretischen Vorhersagen für die Dipolmomente von Neutron und Elektron sind für fast alle supersymmetrischen Modelle von der Größenordnung der gegenwärtigen experimentellen Schranken [DESY 05-149]. Die elektroschwache Skala von 100 GeV kann in supersymmetrischen Theorien mit einer zusätzlichen globalen Symmetrie auf natürliche Weise erklärt werden [DESY 05-193].

Die Frage der dynamischen Stabilität von fünf- und sechs-dimensionalen *Brane-World-Modellen* ist von großer Wichtigkeit für höher-dimensionale vereinheitlichte Theorien. Ein erster Schritt ist dabei die Untersuchung von Orbifold-Kompaktifizierungen fünf- und sechs-dimensionaler Supergravitationstheorien. Die Kopplungen von Materiefeldern auf Fixpunkten an *Bulk-Felder* wurden in fünf und sechs Dimensionen mit Hilfe der Noether-Methode bestimmt [DESY 05-024, DESY 05-056]. Weiter wurden durch die Renormierung induzierte höher-dimensionale Operatoren an den Orbifold-Fixpunkten bestimmt [DESY 05-073, 05-144] und die Struktur von Supersymmetriebrechungstermen untersucht [DESY 05-044]. Von großem Interesse sind ebenfalls Lösungen der Feldgleichungen, die den Grundzustand beschreiben. Für Orbifolds in sechs Dimensionen konnte die allgemeine Lösung gefunden werden [DESY 05-145].

Eichtheorien auf Räumen mit nichtkommutierenden Koordinaten ergeben sich in natürlicher Weise als niederenergetische effektive Theorien aus der Stringtheorie. Sie bilden eine sehr interessante Klasse von Quantenfeldtheorien mit faszinierenden und manchmal unerwarteten Eigenschaften. Phänomenologisch stellt sich die Frage, ob und wie das Standardmodell in diesen Rahmen eingebaut werden kann. Ein wesentlicher Faktor ist dabei, dass die nichtkommutative Eichinvarianz die möglichen Eichgruppen sehr stark einschränkt. Au-

Berdem ist das Infrarotverhalten an das Verhalten im Ultraviolett gekoppelt. Es stellt sich heraus, dass dies zu Lorentz-Invarianz-verletzenden Prozessen führt, die im Falle von vier Raumzeitdimensionen nicht mit dem Experiment vereinbar sind [DESY 05-127]. In höheren Dimensionen können diese unerwünschten Effekte unterdrückt werden [DESY 05-230].

Stringtheorie

Die jüngeren Entwicklungen in der Stringtheorie sind grundsätzlich von zwei verschiedenen Motivationen getragen. Historisch hat Stringtheorie ihren Ursprung in den Bemühungen um eine Beschreibung insbesondere der starken Wechselwirkung. Mit der so genannten AdS/CFT Korrespondenz ist dieser Aspekt der Stringtheorie wieder in eine zentrale Position gerückt. Eine zweite wesentliche Säule der Stringtheorie ist ihr Potential bei der Suche nach einer Quantentheorie der Gravitation und damit bei der Vereinheitlichung aller vier bekannten Wechselwirkungen. Die Forschung der Theorie-Gruppe und des II. Instituts für theoretische Physik der Universität Hamburg war im zurückliegenden Jahr in beiden Bereichen thematisch vertreten.

AdS/CFT Korrespondenz

Die AdS/CFT Korrespondenz postuliert eine hochinteressante Beziehung zwischen stark gekoppelter (supersymmetrischer) Eichtheorie und einer Theorie schwach gekoppelter Strings, die sich im Hintergrund einer Anti-deSitter (AdS) Raumzeit bewegen. Weiterentwicklung und Überprüfung der AdS/CFT-Korrespondenz war ein wichtiger Forschungsschwerpunkt unserer Arbeitsgruppen.

Ein zentrales Problem der AdS/CFT Korrespondenz besteht darin, dass die Quantisierung der Stringtheorie in AdS-Hintergründen bisher nur sehr unzureichend verstanden ist. Die Vermutungen über das Energiespektrum, die aus einem Quanten-Bethe-Ansatz resultieren, wurden kritisch diskutiert mit dem Ergebnis, dass dieser Ansatz vermutlich nur einen Teil des Spektrums

beschreibt [DESY-05-108, DESY-05-163]. Als Vorbereitung einer exakten Quantisierung von Stringtheorie in AdS Räumen wurde eine systematische Untersuchung von Modellen initiiert, in denen Supersymmetrien als Transformationen des Hintergrundes geometrisch realisiert sind [DESY-05-186].

Wesentlicher Baustein für die Stringtheorie auf gekrümmten Hintergrundräumen, und insbesondere in AdS-Räumen, sind nichtrationale konforme Feldtheorien [DESY-05-168]. Die so genannte Liouville-Theorie ist das einfachste Beispiel in dieser wichtigen neuen Klasse von konformen Feldtheorien. Tiefreichende Beziehungen zwischen der Liouville-Theorie und der Mathematik der Riemannschen Flächen folgen aus der Arbeit [math.QA/0510174]. Diese Beziehungen lassen sich insbesondere für das Verständnis der Physik von D-branes auf den betreffenden Hintergrundraumzeiten ausnutzen. Neue D-branes in eng verwandten Hintergründen der zweidimensionalen Stringtheorie wurden in [DESY-05-257] vorgeschlagen.

Untersucht wurde auch eine Anwendung der AdS/CFT Korrespondenz auf die Eigenschaften der effektiven Wirkung einer stark gekoppelten supersymmetrischen $N = 1$ Yang-Mills Theorie [hep-th/0502196]. Für eine supersymmetrische Theorie, die $N = 2$ auf $N = 1$ spontan bricht wurde ein dualer Gravitationshintergrund identifiziert [hep-th/0511280].

Stringkompaktifizierungen

Die zweite zentrale Fragestellung der Stringtheorie besteht in der Einbettung teilchenphysikalischer Modelle sowie in der Untersuchung der phänomenologischen Eigenschaften solcher Stringtheorien. Besondere Bedeutung kommt dabei natürlich dem Studium von Korrekturen zu, die sich aus der ausgedehnten Natur der Strings ergeben.

Die effektive Wirkung von verallgemeinerten Stringkompaktifizierungen mit D-branes, Hintergrundfluss und/oder nicht-trivialer Torsion ist eine geeichte Supergravitation. Solche Wirkungen wurden hergeleitet [hep-th/0502059, hep-th/0505264] und aus Sicht der

Supergravitation untersucht [DESY-05-036, DESY-05-101, DESY-05-134]. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den möglichen Kopplungen eines massiven antisymmetrischen Tensorfeldes. Die Ladungen der D-branes lassen sich mathematisch mit Hilfe von gewisteter äquivarianter K-Theorie berechnen, und für eine bestimmte geometrische Kompaktifizierung wurde die Übereinstimmung mit topologischer K-Theorie im Limes eines großen Volumens gezeigt [DESY-05-227].

Es wird erwartet, dass eine Quantentheorie der Gravitation unter anderem auch Korrekturen zum Einstein-Hilbert Term in der Wirkung erzeugt. Die kosmologischen Implikationen solcher Modifikationen wurden untersucht [astro-ph/0506392]. Ein Quantisierungsschema basierend auf der kovarianten Donder-Weyl Formulierung von Quantenfeldtheorien wurde entwickelt [hep-th/0508170]. Darüberhinaus wurden Aspekte der Quantisierung in verallgemeinerten Raum-Zeit Hintergründen studiert, die in der Stringtheorie nahegelegt werden. Insbesondere wurde der Fall eines zusätzlichen antisymmetrischen Tensorfeldes untersucht [hep-th/0508170, hep-th/0511157].

Mathematische Physik

Auf der Grundlage der mikrolokalen Spektrumsbedingung konnte gezeigt werden, dass die so genannten α -Vakua auf dem de Sitter-Raum unakzeptabel große Fluktuationen des Energie-Impuls-Tensors haben und daher nicht als Zustände des frühen Universums in Frage kommen [DESY-05-075]. Die Rolle der allgemeinen Kovarianz in der algebraischen Quantenfeldtheorie wurde in den Arbeiten [gr-qc/0511118] und [math-ph/0512059] analysiert. In [math-ph/0507013] wurde die Grundlage für eine nichtstörungstheoretische rigorose Konstruktion der Streuoperatoren für eine große Klasse zweidimensionaler Quantenfeldtheorien gelegt. Dabei wurde das Theorem über die Lösbarkeit des Anfangswertproblems der Schrödinger-Gleichung mit zeitabhängigem Hamiltonoperator wesentlich erweitert. Das Infrarotverhalten nichtkommutativer Quantenfeldtheorien wurde in [DESY-05-251] studiert. Eine Analyse der Lorentzinvarianz auf der

Grundlage des Verhaltens unter Reflexionen wurde in [math-ph/0512068] durchgeführt. Die Instantonlösungen des nichtlinearen σ -Modells wurden in [DESY-05-058] diskutiert. Ein Überblick über die algebraische Störungstheorie, insbesondere die Rolle der Renormierungsgruppe und die Irrelevanz von Ableitungstermen, wurde in [hep-th/0501228] gegeben.

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte

In Kooperation mit europäischen Universitäten ist die Hamburger Theoriegruppe an vier Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppen beteiligt, drei davon mit Projektleitern aus der DESY Theorie:

- VH-NG-004: *QCD in exklusiven Prozessen bei HERA* mit der Universität Regensburg,
- VH-NG-005: *Universelle Ereignisgeneratoren für zukünftige Lepton-Collider* mit der Universität Würzburg,
- VH-NG-006: *Particle Physics and Cosmology* mit den Universitäten Padua und Hamburg,
- VH-NG-008: *Hochpräzisionsanalyse von Top-Quark Eigenschaften bei TESLA* mit den Universitäten Karlsruhe, Hamburg und Barcelona.

Außerdem ist die Hamburger DESY Theorie Teil eines Virtuellen Instituts der Helmholtz Gesellschaft, *Particle Cosmology (VIPAC, VH-VI-106)*, in Kooperation mit den Universitäten Bonn, Heidelberg und München. Die Leitung findet in der DESY Theoriegruppe statt. Beteiligung der DESY Theoriegruppe in Hamburg gibt es auch am Virtuellen Institut *Hochenergiestrahlungen aus dem Kosmos (VIHKOS, VH-VI-032)*, einer gemeinsamen Einrichtung der Helmholtz-Zentren Karlsruhe und DESY mit den Universitäten Aachen, HU Berlin, Bochum, Erlangen-Nürnberg, Dortmund, Frankfurt, Hamburg, Heidelberg, Karlsruhe, Mainz, Siegen, Wuppertal und Würzburg, sowie den Max-Planck-Instituten MPIfR Bonn, MPK Heidelberg und MPI München.

DESY nimmt an dem 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.

Des Weiteren sind für das Berichtsjahr die folgenden Drittmittelprojekte am Hamburger II. Institut für Theoretische Physik zu nennen:

- BMBF 05 HT4GUA/4:
Theoretische Interpretation von Hochenergieexperimenten mit HERA, LEP und Tevatron sowie Vorhersagen für LHC und TESLA
- DAAD A/04/39617:
(Michail-Lomonosov-Programm)
- DAAD D/03/39334:
(Acciones Integradas Hispano-Alemana)
- DFG Ha 202/110-1:
(Mercator-Gastprofessur)

sowie die Sachbeihilfen,

- DFG KN 365/3-1,2: *Semi-analytical evaluation of electroweak two-loop Feynman diagrams based on the Bernstein-Tkachov technique*
- DFG KN 365/5-1: *Global analysis of light-hadron fragmentation functions with low-x improvement through the modified leading logarithmic approximation*

- DFG KN 365/6-1: *Polarisation und photonische Wechselwirkung in tiefinelastischer Charmoniumerzeugung zu nächstführender Ordnung der nichtrelativistischen QCD*

Mitarbeit bei der Organisation von Konferenzen

- DESY Theorie Workshop 2005:
Quantum Chromodynamics, DESY, Hamburg
- International Linear Collider Workshop:
LCWS 2005, Stanford CA, USA
- 2005 ILC Physics and Detector Workshop,
Snowmass CO, USA
- Summer School on Particle Physics,
ICTP Triest/IT
- Ringberg Workshop:
New Trends in HERA Physics 2005, Schloß Ringberg, Tegernsee
- Workshop on the Implications of HERA for LHC physics: *HERA and the LHC (2004 – 2005)*, CERN und DESY, Hamburg
- Workshop on the Interplay of Flavour and Collider Physics: *Flavour in the Era of the LHC (2005 – 2007)*, CERN, CH
- Eröffnungskolloquium des Zentrums für mathematische Physik: *ZMP opening colloquium*, Hamburg
- Helmholtz International Summer School: *Heavy Quark Physics*, Dubna, RU

Aktivitäten in Zeuthen

Gitter-Eichtheorie

Die Theorie zur Beschreibung der Eigenschaften der Starken Kraft, die Quantenchromodynamik (QCD), ist ein Grundpfeiler des Standard-Modells der 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.

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

Quantenchromodynamik und Flavorphysik

Im Rahmen der ALPHA-Kollaboration wurden die Simulationen der QCD mit zwei Quarks in enger Zusammenarbeit der Gruppen am DESY und an der Humboldt-Universität Berlin vorangetrieben. Insbesondere wurde die Grundlage für eine Berechnung der leichten (renormierungsgruppen-invarianten) Quarkmassen gelegt. Nach der nicht-perturbativen Verbesserung des Axialstroms [DESY 05-026] wurde auch dessen Renormierung bestimmt [DESY 05-064]. Hiermit konnte die nicht-perturbative Energieabhängigkeit der Quarkmassen im Schrödingerfunktional-Renormierungsschema mit den Quarkmassen bei niedrigen Energien verknüpft werden und eine Abschätzung der

Masse des Strange-Quarks erzielt werden [DESY 05-124]. Es zeigte sich, dass frühere Rechnungen, in denen die Renormierung der Quarkmassen mit Hilfe der Störungstheorie abgeschätzt wurde, systematisch zu kleine Werte ergaben. Für eine völlig befriedigende Berechnung der Quarkmassen bleibt als wichtige Herausforderung für die Zukunft eine Verbesserung der Kontinuumsextrapolation [DESY 05-124].

Schwere Quarks wie das b-Quark werden präzise durch die *Heavy Quark Effective Theory* beschrieben. Die entscheidende Idee zur nicht-perturbativen Formulierung und Anwendung dieser Theorie wurde durch die ALPHA-Kollaboration ausgearbeitet und in führender Ordnung der Entwicklung in der inversen Quarkmasse $1/m$ angewendet. Inzwischen konnte eine DESY/NIC-Kollaboration zeigen, dass eine geringfügige Änderung der Diskretisierung erhebliche Vorteile in praktischen Simulationen mit sich bringt und sogar die Diskretisierungsfehler etwas reduziert [DESY 05-082]. So ließen sich erstmals auch die linearen Korrekturen in $1/m$ für eine physikalische Größe berechnen. Die noch vorläufigen Ergebnisse, erzielt in der Valenzquark-Approximation, wurden auf der Gitter-Jahreskonferenz vorgestellt [DESY 05-170, DESY 05-173].

Neben solchen direkt auf die Phänomenologie orientierten Arbeiten waren verschiedene Fragen zu den Grundlagen der Gittereichtheorien Gegenstand der Forschung. Die Theorie der Diskretisierungseffekte wurde in zwei-dimensionalen, asymptotisch-freien Modellen eingehend untersucht [DESY 05-091, DESY 05-188, DESY 05-187, hep-lat/0509043] und effektive Modelle für QCD-Observable in der reinen Eichtheorie sowohl neu entwickelt [DESY 05-069, DESY 05-154] als auch intensiv getestet [DESY 04-230, DESY 05-154].

Das APE-Projekt: Entwicklung von Parallelrechnern

Die Simulationen der QCD auf dem Gitter erfordern eine enorme Rechenleistung, können aber sehr gut auf relativ einfachen Rechnerarchitekturen parallelisiert werden. Um die erforderlichen Rechenressourcen auf effiziente Weise zu realisieren, werden unter Mitwirkung von

theoretischen Physikern in verschiedenen internationalen Projekten Spezialrechner entwickelt, die für diese Anwendungen optimiert sind. In Europa begannen solche Entwicklungen Mitte der 80er im Rahmen des APE Projektes (Array Processor Experiment) am Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Italien. Seit 1996 beteiligen sich auch Mitglieder der Theorie-Gruppe in Zeuthen sowie der Forschergruppe Elementarteilchenphysik des John von Neumann-Instituts für Computing (NIC) an diesen Entwicklungsarbeiten.

Die Rechner der APEmille-Baureihe laufen in Zeuthen seit 2001 mit einer Installation von über 1 000 Prozessoren rund um die Uhr in stabilem Produktionsbetrieb. Die beachtliche Rechenleistung von zusammen mehr als 500 Milliarden Gleitkomma-Operationen pro Sekunde (500 Gigaflops) wird Wissenschaftlern aus Deutschland und dem europäischen Ausland über NIC zur Verfügung gestellt.

Da diese Rechenleistung nicht mehr ausreicht, um international konkurrenzfähige Forschungsprojekte durchzuführen, arbeitet die APE Projektgruppe in enger Zusammenarbeit mit dem INFN und der Université Paris Sud an der Entwicklung einer neuen Rechnergeneration, apeNEXT. Ein Meilenstein hierzu wurde im Frühjahr 2005 mit dem Aufbau eines ersten großen Prototyp-Systems mit 512 Prozessoren erreicht (Abbildung 55). Auf diesem System wurden umfangreiche Tests mit Physik-Programmen, darunter auch QCD Simulationen mit dynamischen Quarks, durchgeführt, um die stabile Funktionsfähigkeit von Hardware und Software zu verifizieren.

Eine wichtige Neuerung in der apeNEXT-Architektur besteht darin, dass die gesamte Funktionalität eines Rechenknotens, einschließlich Schnittstellen zum externen Speicher und zum Kommunikationsnetzwerk, auf einem einzigen ASIC Chip integriert ist. Das dreidimensionale Netzwerk verfügt über eine sehr große Bandbreite und eine extrem niedrige Latenzzeit (ca. 100 ns). Der Datenaustausch kann gleichzeitig in mehrere Richtungen und ohne Beeinträchtigung der Rechenaktivität auf dem Prozessor erfolgen.

Die effiziente Nutzung dieser neuen Architekturmerkmale stellt besondere Herausforderungen an die Sys-

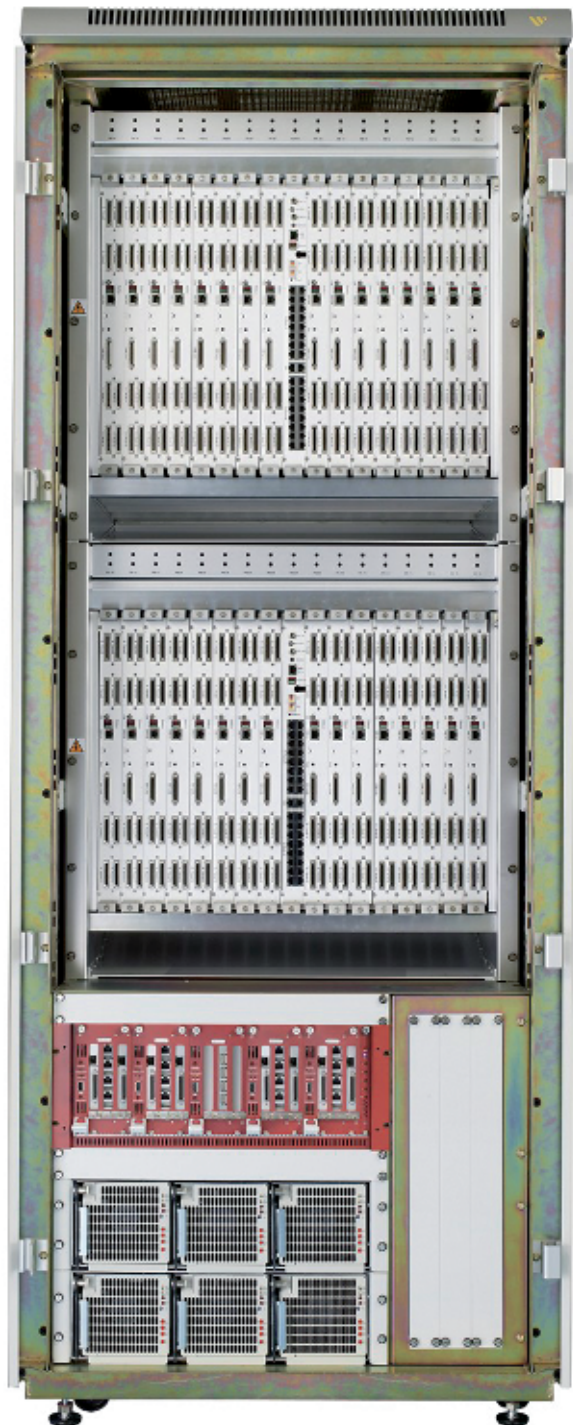


Abbildung 55: Ein apeNEXT Rechner mit 32 Boards und 512 Prozessoren (im Bild noch ohne Kommunikationskabel). Ein solches System hat ca. 0.6 Tflops Spitzenrechenleistung, benötigt ca. 0.6 m² Stellfläche und hat einen Leistungsbedarf von etwa 8 kW.

temsoftware dar. Deshalb haben sich in 2005 die Aktivitäten der Projektgruppe in Zeuthen auch stark auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich konzentriert. Dazu gehören Teile des Betriebssystems, innovative Algorithmen für die automatische Optimierung des Assembly Codes, sowie die Realisierung des C-Compilers.

Der Aufbau der apeNEXT-Installation in Zeuthen hat im Oktober mit der Lieferung der ersten Maschine und der Portierung und Optimierung von umfangreichen Physik-Programmen begonnen. Die endgültige Installation von 4 Maschinen mit insgesamt 2 048 Prozessoren und mit einer Spitzenrechenleistung von etwa 2.5 Tflops ist für Anfang 2006 vorgesehen.

Physik an Beschleunigern

Perturbative Untersuchungen auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung (QCD) befassten sich mit Fragestellungen aus dem Bereich der unpolarisierten und polarisierten tief-inelastischen Streuung und mit Vorhersagen für inklusive Streuprozesse am Large Hadron Collider (LHC). Die QCD-Analyse der tief-inelastischen Strukturfunktionen wurde in Programmentwicklung und Datenanalyse fortgesetzt [DESY 05-201]. Mit der Berechnung der Wilson-Koeffizienten der tief-inelastischen Strukturfunktionen zur dritten Ordnung der Störungstheorie gelang die erste vollständige QCD Vorhersage zu dieser Ordnung überhaupt [DESY 05-063]. Es handelt sich dabei um Vorhersagen für einen harten Streuprozess, der von einer kinematischen Skala (Bjorken- x) abhängt. Strukturelle Untersuchungen für die anomalen Dimensionen in 3-Schleifen-Approximation führten zu kompakten Mellin-Raum Darstellungen mit einer sehr geringen Zahl von Basisfunktionen für präzise und schnelle Numerik [DESY 05-007]. Ähnlich wurden die Wilson-Koeffizienten in 2-Schleifen-Approximation für den (un-)polarisierten Drell-Yan Prozess und für den Produktionsquerschnitt von (pseudo-)skalaren Higgs-Bosonen im Limes schwerer Top-Quarks in der Proton-Proton Streuung dargestellt [DESY 05-007]. Mit Hilfe der Wilson-Koeffizienten in 3-Schleifen-Approximation konnte die Resum-

mation von großen Logarithmen nahe der Produktionsschwelle entscheidend verbessert werden [DESY 05-105]. Des Weiteren konnten auch effektive Vertices, so genannte Formfaktoren, in 3-Schleifen-Approximation extrahiert werden [DESY 05-106, DESY 05-138]. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurden dann insbesondere die dominanten Korrekturen zu dritter Ordnung im Limes schwerer Top-Quarks berechnet, siehe Abbildung 56 [DESY 05-152]. Nach diesen Prozessen wird experimentell in Zukunft bei LHC, und zurzeit bei RHIC, gesucht.

Das Programm XSUMMER, geschrieben in der Formelmanipulationssprache FORM wurde veröffentlicht [DESY 05-104]. Es ermöglicht die automatisierte, symbolische Summation von verallgemeinerten geschachtelten Summen.

Im Rahmen des HERA-LHC Workshops wurden übergreifende Aspekte, die die Physikprogramme beider Beschleuniger betreffen, analysiert, um einen optimalen Nutzen der Ergebnisse des Programms bei HERA für die Physik bei LHC zu erreichen. Theoretische und phänomenologische Beiträge auf diesem Gebiet wurden zusammenfassend dargestellt [hep-ph/0511119].

Zur weiteren Ausarbeitung des Physikprogramms des e^+e^- Linearcolliders ILC wurden unter anderem Vorhersagen für elektroschwache Korrekturen zur Higgsstrahlung und zur Paarproduktion von Top-Quarks (mit anschließendem Zerfall) berechnet [DESY 05-046, DESY 05-199, hep-ph/0501246]. Die Automatisierung solcher Rechnungen mit den Computeralgebraprogrammen DIANA und aItalc wurde weiter ausgearbeitet. Das Paket aItalc wurde veröffentlicht; es erlaubt die automatische Berechnung einer großen Klasse von Fermionpaar-Produktionsprozessen [hep-ph/0510414, hep-ph/0509367, DESY THESIS-2005-004]. Bei der Berechnung der 2-Schleifen-Korrekturen zur Bhabha-Streuung wurde es durch die Kombination von Differentialgleichungsalgorithmen und Mellin-Barnes-Transformationen möglich, eine neue Klasse von massiven Boxdiagramm-Topologien zu berechnen [DESY 05-215, DESY 05-151]. Die Ermittlung von minimalen Masterintegral-Systemen unter Ver-

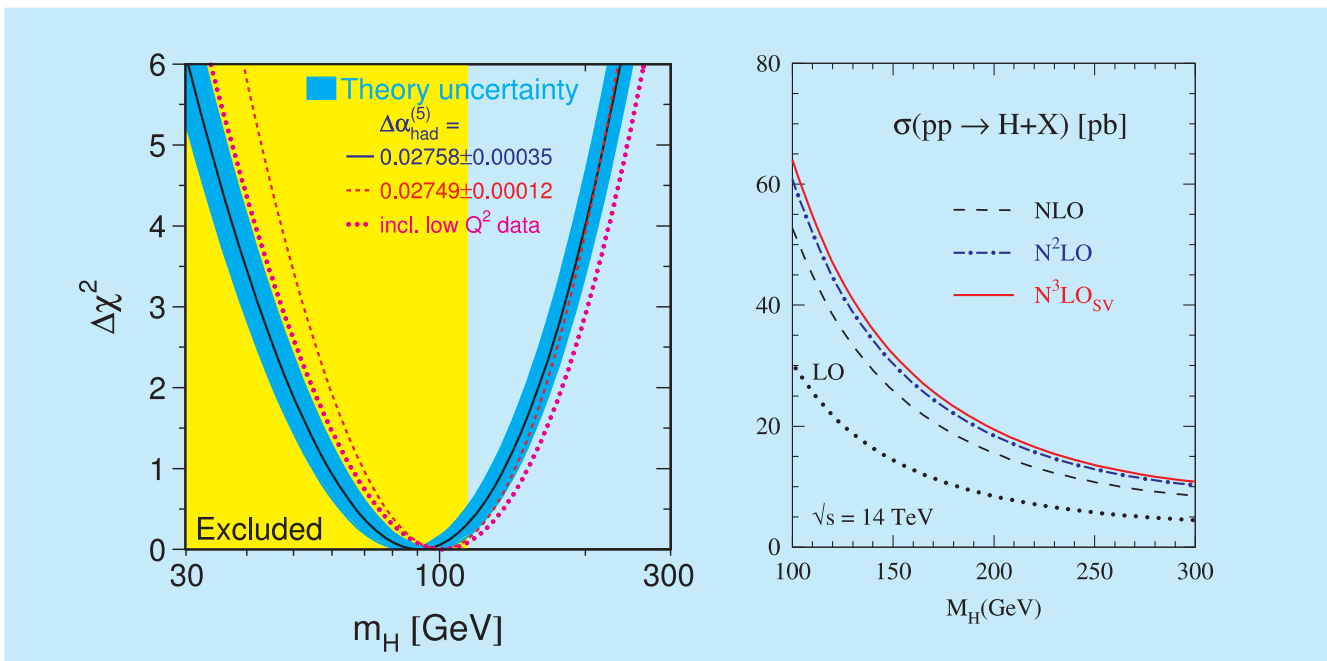


Abbildung 56: Links: Vorhersage der Higgs-Boson-Masse mit ZFITTER, aus einem Globalfit an Colliderdaten im Rahmen des Standardmodells (LEP Electroweak Working Group, CERN-PH-EP/2005-051 und http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/plots/summer2005/s05_blueband.eps); rechts: Vorhersage der Higgsproduktion mit QCD-Korrekturen.

wendung von Groebner-Basen wurde erstmals erfolgreich auf Zweiloop-Vertexdiagramme mit mehreren Skalen angewendet, um anomale Vertices und Aussagen zur Nicht-Renormierung zu studieren [DESY 05-211].

Das Programm ZFITTER, weltweit für alle Präzisionsdatenanalysen im Standardmodell benutzt, wurde in den letzten Jahren mehrfach überarbeitet und ergänzt. Der Support des Programms durch die ursprünglichen Autoren wurde zunehmend schwieriger, und daher bildeten Autoren und Nutzervertreter eine ZFITTER-Supportgruppe, die von DESY koordiniert wird und Updates von Programm und Beschreibung verantwortet [DESY 05-034]. Abbildung 56 zeigt die Vorhersage der neuesten Version dieses Analysenprogramms für die Higgsmasse im Standardmodell. Sie ist von großem Interesse für die Higgs-Suche bei LHC und beruht auf vervollständigten Zweiloop-Rechnungen [DESY 05-122], die in ZFITTER implementiert wurden.

Konferenzen

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

- School on Computer Algebra and Particle Physics (CAPP 2005)
- HERA-LHC Workshop, 2004/05
- X International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research (ACAT05)

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte

Im Berichtszeitraum arbeitete die Theorie-Gruppe in Zeuthen in einem TMR-Netzwerk der Europäischen

Union mit. Das Netzwerk EURIDICE, *European Investigations on Dafne and other International Collider Experiments using Effective Theories of Colors and Flavours from the Phi to the Upsilon*, koordiniert einen großen Teil der europäischen Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet.

Es besteht eine enge Zusammenarbeit der Theoriegruppe in Zeuthen mit der Humboldt-Universität Berlin, der Universität Bielefeld, NIKHEF Amsterdam/NL, der Universität Leiden/NL, mit CERN, dem IPPP Durham/UK, dem Institut für Theoretische Physik am Harish Chandra Research Institute Allahabad/IN, dem KEK Tsukuba/JP, den Universitäten Cottbus, Leipzig, Madrid, Rom II, Rom III, Münster, Hiroshima/JP, Shanghai/CN und dem RISC, Linz/AT. An der Humboldt-Universität Berlin wurden Vorlesungen über *Quantenchromodynamik an Beschleunigern* und über *Spezielle Aspekte der Elementarteilchentheorie* gehalten, und an der Universität Potsdam über *Quantenfeldtheorie*.

Die Theorie-Gruppe in Zeuthen ist am Graduiertenkolleg *Strukturuntersuchungen, Präzisionstests und Erweiterungen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik* beteiligt, zusammen mit Kollegen von HU Berlin, FU Berlin, TU Dresden, MPI Potsdam. Ferner kooperieren wir im Sonderforschungsbereich/Transregio SFB/TR-09 *Computergestützte Theoretische Teilchenphysik* mit Gruppen von der RWTH Aachen, der HU Berlin, der TU Karlsruhe.

Aktivitäten am NIC

Die Forschergruppe Elementarteilchenphysik des John von Neumann Instituts (NIC) hat im vergangenen Jahr einige international viel beachtete Erfolge auf dem Gebiet der Gitter-QCD erreichen können. So konnte die Gruppe – zumindest in der Valenzquark Approximation – einen präzisen Test einer neuen Formulierung von Gitterfermionen, den so genannten *Twisted-Mass-Fermionen*, durchführen. Dieser Ansatz verspricht einige bemerkenswerte Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Gitterfermionen: so ist die ent-

sprechende Gittertheorie automatisch $O(\alpha)$ -verbessert. Dies heißt, dass alle Gitterartefakte, die linear im Gitterabstand auftreten, automatisch eliminiert werden, wenn die Parameter der Theorie geeignet eingestellt sind. Zudem haben diese Fermionen eine explizite Fermionmasse zur Regularisierung des niedrig gelegenen Eigenwertspektrums, so dass kleine und bisher nicht erreichbare Werte der pseudoskalaren Masse eingestellt werden können.

Die Tests, die die NIC-Forschergruppe durchgeführt hat, waren sehr erfolgreich und konnten die oben skizzierten Eigenschaften der Twisted-Mass-Gitterfermionen in praktischen Simulationen nachweisen. Dies macht diese Art der Gitterfermionen zu einem sehr geeigneten Kandidaten für die Gitterformulierung der QCD und insbesondere für die Simulation leichter dynamischer Quarks.

Im Falle dynamischer Quarks war die NIC-Forschergruppe in der Lage, zum ersten Mal ein umfassendes und detailliertes Bild der Phasenstruktur der Gitter-QCD anzugeben. Dabei erwies es sich, dass die Phasenstruktur wesentlich komplizierter ist, als vorher allgemein angenommen wurde. Abbildung 57 zeigt ein schematisches Bild des Gitter-QCD-Phasendiagramms. Das Verständnis der Phasenstruktur der Gitter-QCD ist ein essentielles Element in der Analyse der Gitter-QCD.

Das oben diskutierte Twisted-Mass-Projekt, in dem die NIC-Gruppe die Sprecherrolle hat, wurde als eines der ersten Projekte überhaupt für die DEISA Initiative ausgewählt, einem virtuellen Verbund von europäischen Supercomputer-Zentren, die über eine Grid-Infrastruktur zusammengeschaltet sind.

Ein weiterer Durchbruch konnte von der NIC-Forschergruppe im Rahmen der Algorithmus-Entwicklung erzielt werden. Auf der Gitterkonferenz 2001 in Berlin wurden von A. Ukawa die Kosten für dynamische Simulationen als Funktion des Verhältnisses der pseudoskalaren zur Vektor-Meson-Masse berechnet. Diese Funktion ist in Abbildung 58 (Kurve ganz rechts) gezeigt. Wie man erkennt, steigen die Kosten gewaltig an, wenn man sich dem Punkt nähert, an dem dieses Massenverhältnis seinen physikalischen Wert annimmt. In der Literatur ist diese Kurve als *Berlin Wall* bekannt.

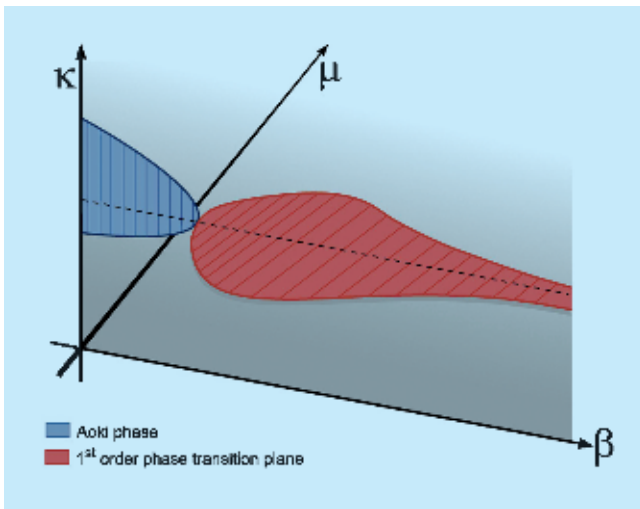


Abbildung 57: Das Bild des Phasendiagramms der Gitter-QCD nach heutigem Kenntnisstand. β ist die inverse Eichkopplung, κ die inverse Quarkmass und μ der Twisted-Mass Parameter.

Es gelang der NIC-Forscherguppe im letzten Jahr, eine neue Algorithmusvariante zu entwickeln, die den *Berlin Wall* beträchtlich verschiebt (die beiden linken Kurven). Als Konsequenz können die Simulationskosten um mindestens eine Größenordnung verringert werden. Zieht man die Rechenleistung moderner Supercomputer in Betracht, seien es kommerzielle Maschinen oder Spezialrechner des Typs apeNEXT, werden damit heute Rechnungen möglich, die man vor einem Jahr als unrealistisch angesehen hatte.

Ebenfalls in dynamischen Simulationen konnte die NIC-Forscherguppe einen ersten, physikalisch sehr wichtigen Wert der Masse des Strange-Quarks berechnen. Dies ist ein signifikanter Test der QCD. Das Ergebnis von M_{strange} im Bereich von 100–130 MeV stimmt mit experimentellen Bestimmungen der Masse des Strange-Quarks gut überein.

Obwohl die Gitter-QCD die Haupt-Forschungsrichtung der NIC-Forscherguppe darstellt, beschäftigt sie sich auch mit anderen Themen. So wurden in zweidimensionalen Modellen (Schwinger- und Groß-Neveu-Modell) konzeptionelle Fragen für die QCD geklärt. Eine andere wichtige Forschungsrichtung ist die dynamische Simulation chiral invarianter Overlap-Fermionen.

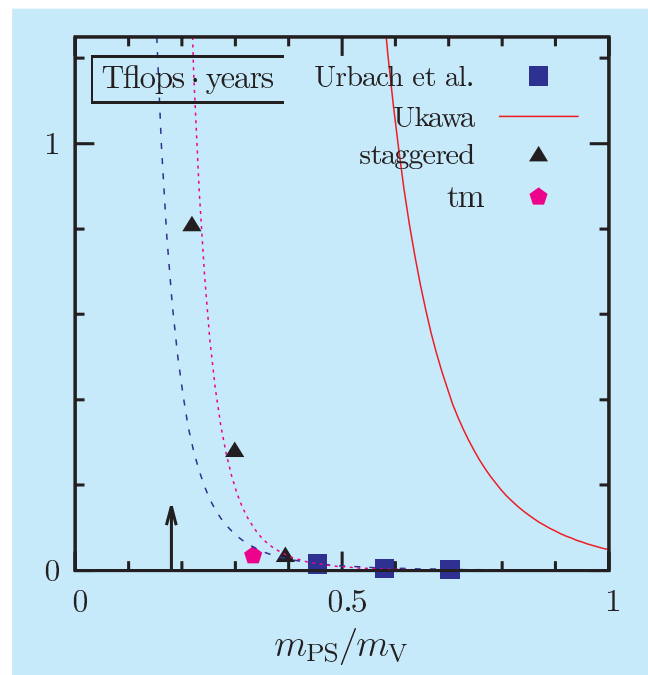


Abbildung 58: Das Verschieben des Berlin Wall durch neue Algorithmen-Entwicklungen.

apeNEXT

apeNEXT ist die neueste Maschine der APE-Supercomputer-Linie. Diese für die Gitter-QCD optimierten Spezialrechner sind für eine Spitzenleistung von 10 Teraflops konzipiert. Die Hardware der Maschine ist fertig gestellt, getestet und Physiker rechnen bereits auf Prototyp-Installationen. Größere Systeme sind bereits, bzw. werden in der nächsten Zeit, europaweit installiert in Italien, Frankreich und Deutschland (DESY und Bielefeld). Zurzeit läuft die Maschine noch nicht bei der geplanten Clock-Frequenz, so dass man etwa 20% Performanceverlust hat.

Internationale Zusammenarbeit

Die NIC Gruppe ist an mehreren internationalen Kollaborationen beteiligt. Sie ist involviert in der ALPHA-Kollaboration, die europaweit vernetzt ist. Die QCDSF

Kollaboration unterhält enge Verbindungen mit der britischen UKQCD Kollaboration und mit der Lattice Hadron Physics Collaboration (LHPC) am Jefferson Lab. Sie arbeitet zudem eng mit der Universität in Regensburg zusammen. Die ursprünglich auf Deutschland (Zeuthen, Hamburg, Münster) beschränkte Twisted Mass Kollaboration ist mittlerweile europaweit ausgedehnt mit Partnern in Italien (Universitäten Rom I, II und III, Mailand), Frankreich (Orsay), Großbritannien (Liverpool) und Spanien (Valencia).

Die NIC Gruppe ist an zwei nationalen, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützten Projekten beteiligt. Das erste Projekt ist ein Sonderforschungsbereich/Transregio SFB/TR9-03 *Computergestützte theoretische Teilchenphysik*. Dieses Projekt ist auf 3×4 Jahre ausgelegt und vereinigt die Universitäten Karlsruhe, Aachen und HU Berlin, sowie die NIC und Theorie Gruppen des DESY Zeuthen. (s.a. http://www.uni-karlsruhe.de/fs/Uni/mitarbeiter/pm_1022.html)

Das zweite Projekt ist die DFG Forschergruppe Gitter-Hadronen-Phänomenologie <http://www-cgi.uni-regensburg.de/~sow10631/fogu/>. An dieser Forschergruppe beteiligen sich die Universitäten Regensburg, HU Berlin und Leipzig, sowie das MPI in München und das NIC, DESY Zeuthen. Diese DFG-Forschergruppe ist in diesem Jahr erfolgreich verlängert worden.

Die NIC Gruppe ist außerdem an drei internationalen Projekten beteiligt:

INTAS Project 2000-111 *Hadron Physics and Vacuum Structure from Lattice QCD* (mit IHEP, ITEP, Dubna, Steklov Institute, ETH Zürich, HU Berlin, MPI München, Universität Wuppertal). Dieses durch die Alexander-von-Humboldt-Stiftung, dem Landau- und Intas-Programm geförderte Projekt dient der Zusammenarbeit und dem wissenschaftlichen Austausch mit

Ländern aus Osteuropa (Polen, Russland und Bulgarien).

Euridice *European Investigations on Dafne and other International Collider Experiments using Effective Theories of Colors and Flavours from the Phi to the Upsilon* (<http://www.lnf.infn.it/theory/rtn/>). Das Netzwerk hat ein breit angelegtes Trainingsprogramm, das in erster Linie für Studenten ausgerichtet ist, aber auch durch gegenseitige Besuche und regelmäßige Workshops den beteiligten Wissenschaftlern erlaubt, über ihre engere Fachrichtung hinaus zusammenzuarbeiten.

I3HP Dies ist ein europäisches Projekt im Rahmen des 6ten Rahmenprogramms der EU und stellt eine Infrastruktur für Hadronen und Kernphysik dar. Hier ist NIC koordinierend für die Gittereichtheorie vertreten mit dem Ziel der Untersuchung der Spinstruktur der Hadronen.

Weitere NIC Aktivitäten

LATFOR Das Lattice Forum (LATFOR) der deutschen Gittergemeinschaft mit Assoziation von Österreich und Schweiz ist mittlerweile ein fester Bestandteil der deutschen Gittereichtheorie. Mitglieder der NIC Gruppe sind aktive Mitglieder von LATFOR.

Eine weitere Aktivität, an dem die NIC-Gruppe beteiligt ist, ist das ILDG (International Lattice Data Grid). Dies ist eine Initiative, weltweit ein Gridsystem aufzubauen, das es erlaubt, Konfigurationen einfach über einen semantischen Zugriff auszutauschen und zu verwenden. Das ILDG erlaubt so eine wesentlich effizientere Verwertung dieser teuren Rohdaten aus den Simulationen. Mitglieder der NIC Gruppe arbeiten aktiv in den Arbeitsgruppen für Metadata und Middleware dieser Initiative mit.

Astroteilchenphysik

Gruppenleiter: S. Schlenstedt

Die Neutrinoastrophysik-Gruppe in Zeuthen arbeitet in Projekten an zwei Standorten: am Südpol und am Baikalsee. Das Schwergewicht der Aktivitäten liegt bei AMANDA, dem Neutrino-Teleskop am Südpol und bei seinem Folgeprojekt, dem IceCube-Teleskop. Der andere Detektor ist NT200+ im sibirischen Baikalsee. Das Nachweisprinzip dieser Teleskope besteht in der Registrierung und klaren Identifizierung von aufwärts fliegenden Myonen oder von isolierten Teilenschauern (*Kaskaden*). Die Teleskope bestehen aus einer gitterförmigen Anordnung von Photoröhren (PMs), mit deren Hilfe das Cherenkov-Licht der Teilchen registriert wird. Gemessen werden Ankunftszeit (mit einer Genauigkeit von 1–5 ns) und Stärke der Lichtsignale, woraus Richtung und Energie der Teilchen rekonstruiert werden können. Die Kollaborationen AMANDA und IceCube haben sich im März 2005 zu einer gemeinsamen Kollaboration *IceCube* zusammengeslossen, mit C. Spiering (DESY) als gegenwärtigem Sprecher.

Das Baikal-Experiment

Der Machbarkeitbeweis für Neutrino-Teleskope unter Wasser wurde durch das Baikal-Experiment erbracht. Das 1998 in Betrieb genommene Baikal-Teleskop NT200 umfasst 192 Photomultiplier an 8 Trossen.

Im März/April 2005 wurde die Anlage um drei auf einem 100 m-Radius liegende Trossen zum Teleskop NT200+ erweitert. Dieser 200 m hohe Detektor hat ein geometrisches Volumen von mehr als 5 MTonnen.

Die optimierte Vergrößerung der Anzahl der PMs um 15% erhöht die Sensitivität auf hochenergetische Teilchen-Kaskaden um einen Faktor 4. Die Suchstrategie für Kaskaden zielt auf elektromagnetische oder hadronische Schauer in einem sehr großen Volumen unterhalb des NT200-Detektors ab, wobei Lokalisation und Energiemessung der Schauer wegen der geringen Lichtstreuung im Baikal schon mit einer geringen Zahl von PMs möglich ist. Die im Jahr 2005 aus den Daten der Jahre 1998-2002 abgeleitete obere Grenze für den Fluss hochenergetischer, diffus eintreffender Neutrinos aus Quellen mit einem E^{-2} -Spektrum wurde zu $dF/dE \cdot E^2 < 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ bestimmt und ist in Übereinstimmung mit dem ersten von AMANDA publizierten Limit. Mit NT200 wurde außerdem die derzeit niedrigste Grenze für den Fluss relativistischer magnetischer Monopole bestimmt.

Ein DESY-Beitrag zu NT200+ bestand in Bau und Installation eines Unterwasser-Lasermoduls. Die Nanosekunden-Impulse dieses Lasers dienen der Zeiteichung der PMs an den drei neuen Strings. Darüber hinaus wurde die Datenübertragung zum Ufer modernisiert, um den erhöhten Datenfluss zu ermöglichen. Dazu wurden erstmalig embedded PCs und Netzwerk-Komponenten unter Wasser installiert. Auch an dieser Entwicklung war die DESY-Gruppe federführend beteiligt. Schließlich wird mit Hilfe von DESY die Satelliten-Kommunikation zwischen dem Uferzentrum und Europa durch Installation einer Breitband-Verbindung verbessert. Für die nächsten zwei Jahre wird NT200+ das größte Neutrino-Teleskop auf der Nordhalbkugel sein, ehe es voraussichtlich durch ANTARES im Mittelmeer überholt wird.

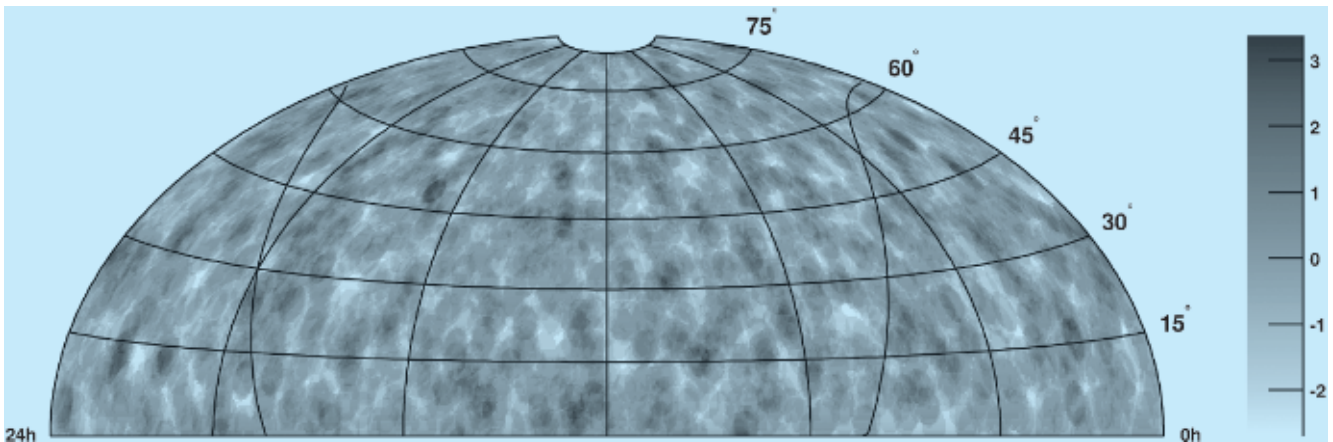


Abbildung 59: Himmelskarte der Signifikanz für punktuellenartige Emission. Es liegt keine Abweichung von der Erwartung einer reinen Untergrundmessung vor.

AMANDA

Der AMANDA-II Detektor besteht aus 19 Strings. AMANDA-II hat eine effektive Fläche von 25000 m^2 für 1-TeV-Myonen und ist damit etwa 25-mal so sensitiv wie die bisher größten unterirdischen Neutrino-Detektoren.

Die Hauptaktivität der DESY-Gruppe war die Suche nach Myon-Neutrinos aus extraterrestrischen Punktquellen. Die Daten der Jahre 2000-2003 waren 2004 in DESY prozessiert und gefiltert worden. Abbildung 59 zeigt die Himmelskarte der Signifikanz der insgesamt 3229 registrierten Neutrinos.

Sie ist kompatibel mit der Annahme, dass es sich um in der Erdatmosphäre erzeugte Neutrinos handelt. Die abgeleitete Grenze für den differentiellen Fluss von Myon-Neutrinos aus Punktquellen (gemittelt über die nördliche Hemisphäre) beträgt $dF/dE \cdot E^2 \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Bei der Analyse wurde besonders auf den so genannten Multi-Messenger-Aspekt Wert gelegt, d. h. die Korrelation der Neutrinodaten zu Daten, die mit Gamma oder Röntgenteleskopen genommen wurden. Dabei wurde eine interessante (obwohl statistisch nicht signifikante) Koinzidenz beobachtet. Es wurden drei potentielle Quellen, die gelegentliche Gamma- oder Radio-Ausbrüche zeigen, vorbestimmt. Aus der Richtung der einen, dem Blazar 1ES 1959+650,

wurden über vier Jahre 5 Neutrinos registriert, davon 3 innerhalb von 90 Tagen. In diesem Zeitraum zeigte das Objekt starke Gamma-Ausbrüche, und zwei der Neutrinos lagen sehr dicht an deren Maxima. Interessanterweise handelte es sich bei einem dieser Gamma-Ausbrüche um einen so genannten Orphan-Flare, der nicht durch erhöhte Röntgenaktivität begleitet wurde. Solche Prozesse sind besonders gute Kandidaten für die Emission von Neutrinos.

Aus der Vielzahl weiterer Ergebnisse, die mit AMANDA im Jahr 2005 erhalten wurden, soll die Suche nach Myonen erwähnt werden, die von Neutrinos aus der Annihilation von WIMPs (Weak Interacting Massive Particles – Kandidaten für die dunkle Materie) in der Sonne entstanden sind. Grenzen an den Fluss solcher Myonen schränken die Anzahl von supersymmetrischen (SUSY) Modellen ein, die die dunkle Materie durch Neutralinos, die leichtesten SUSY-Teilchen, erklären. Das AMANDA Limit für solche Myonen aus der Sonne beträgt $2.5 \cdot 10^3 \text{ km}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$ und schließt damit ähnlich viele SUSY-Modelle aus, wie direkte Suchmethoden, die Wechselwirkungen der WIMPs selbst nachzuweisen versuchen.

Die wichtigsten AMANDA-Aktivitäten der DESY Gruppe neben der Analyse bestanden in der Zeitkalibration des Detektors und der Erstellung und Installation eines online Filters am Pol. Weiterhin wurden

die Daten, die im Jahre 2004 am Pol aufgezeichnet wurden, mit Hilfe von am DESY entwickelten Qualitätskriterien neu gefiltert und der Kollaboration zur Verfügung gestellt. Damit liegen Daten von fünf Jahren in einem einheitlichen Schema als Standard-Datensatz vor. Mit Hilfe dieser Daten wurden im Vergleich zu simulierten Datensätzen die absolute und effektive PM Empfindlichkeit bestimmt.

IceCube

Der IceCube-Detektor soll aus 4800 PMs an 80 Trossen (*Strings*) bestehen, bei 125 m Stringabstand und 17 m Abstand zwischen den PMs entlang eines Strings. Die PMs sind in einer Tiefe von 1.45–2.45 km in dem 3 km dicken antarktischen Eisschild installiert. Das Vorläuferteleskop AMANDA-II wird in IceCube integriert. Die PM-Information von IceCube wird im optischen Modul digitalisiert und dann über elektrische Kabel an die Oberfläche übertragen. Dieses Konzept wird DOM (Digitaler Optischer Modul) genannt. IceCube wird ergänzt durch einen Luftschauerdetektor IceTop, der aus 160 großen Tanks, die mit Eis gefüllt sind, besteht. Beim Durchgang von Teilchen aus Luftschauern wird Cherenkov-Licht erzeugt. Für IceTop werden weitere 360 PMs hergestellt.

Die Saison 2004/05 diente als erster voller Technologietest für die neue Heißwasser-Bohranlage. Nach Überwindung von Anlaufschwierigkeiten beim Bohrvorgang wurde erfolgreich ein erster IceCube-String mit 60 DOMs installiert. Alle DOMs arbeiten einwandfrei. Außerdem wurden 8 IceTop-Tanks installiert; auch diese zeigen das geplante Verhalten. Mit IceCube und IceTop wurden über das ganze Jahr 2005 Daten genommen. Schon wenige Wochen nachdem die DOMs von IceCube eingefroren waren und der gesamte String ausgelesen wurde, konnten die ersten Ergebnisse zum Verhalten des Detektors präsentiert werden. In praktisch allen Parametern wurden die vorgegebenen Forderungen überboten, z. B. für die Zeitauflösung etwa 3 ns (statt 5 ns) oder einer Rauschrate von typisch 700 Hz. Eine Zeitschriftenveröffentlichung zum technischen Verhalten des Detektors ist in Vorbereitung. Abbildung 60

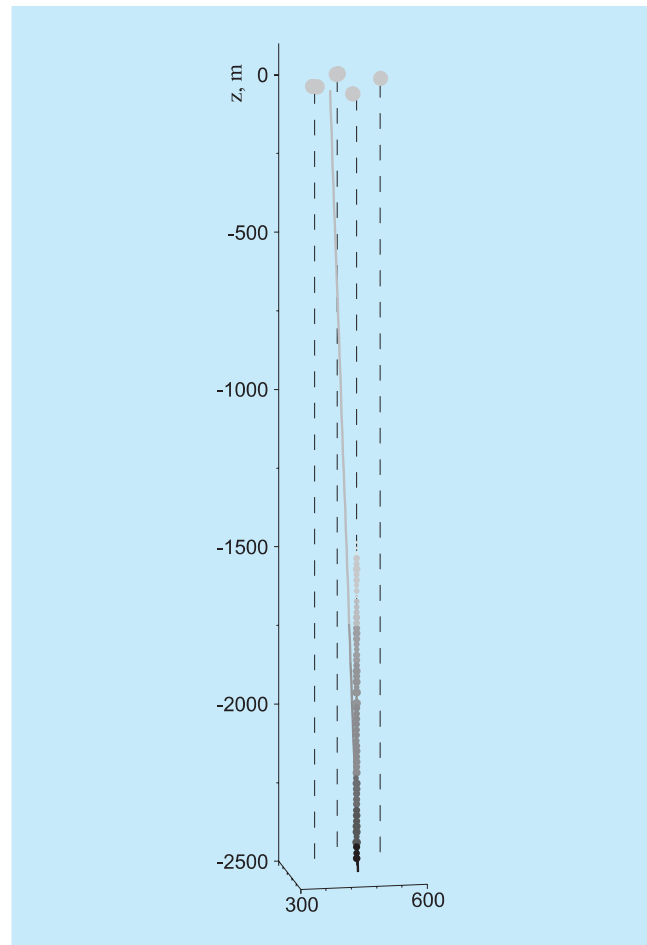


Abbildung 60: Ein atmosphärisches Myon im IceCube Teleskop, das zeitgleich mit einem Schauer auf der Eis-Oberfläche eintraf (sichtbar in den IceTop-Detektoren). Die gestrichelten Linien zeigen die Strings. Die Graustufen entsprechen den unterschiedlichen Ankunftszeiten der Signale.

zeigt eines der etwa 50 Millionen registrierten physikalischen Ereignisse: ein von oben nach unten laufendes Myon, das mit dem IceCube-String registriert wurde und aus einem Luftschauer stammt, der parallel mit IceTop aufgezeichnet wurde. Der Plan für die Saison 2005/06 sieht die Installation von bis zu 10 Strings vor, in den Folgejahren 14–16 Strings, so dass der Detektor im Jahre 2010/2011 fertig gestellt sein kann.

DESY hat 2005 die folgenden Aufgaben innerhalb des IceCube Projekts erfüllt:

- Nach 60 DOMs im Jahr 2004 wurden in 2005 160 DOMs montiert und getestet.
- Für alle innerhalb der Kollaboration gefertigten etwa 1000 DOMs wurde magnetische Abschirmungen bereitgestellt (in Zusammenarbeit mit dem ITEP Moskau).
- Die Massenproduktion des von DESY entwickelten Empfangsteils der DOMs an der Oberfläche (DOR – Digital Optical module Readout) wurde begonnen und nach Finanzierung der Partner-Universitäten durch die Verbundforschung an die Universitäten Mainz und Wuppertal übergeben. Darüber hinaus wurde mehrere Elektronikarten zur Zeitsynchronisation von AMANDA und Ice-Cube entwickelt und gebaut.
- Der Universität Dortmund wurde technische Hilfe bei der Spezifikation und beim Test der PMT-Hochspannung geleistet.
- Die Entwicklung der Rekonstruktionssoftware der Kollaboration wurde koordiniert. Es wurde Software geschrieben, die im Jahre 2006 am Südpol im online-Filter eingesetzt werden wird.
- Für den IceTop Detektor wurde Monitoring-Software entwickelt.
- Es wurden Simulations-Datensätze auf dem Computer-Cluster erzeugt, die zur Verifikation der Rekonstruktions-Algorithmen verwendet wurden.
- Es wurde ein Test-Detektor vorbereitet und gebaut, mit dem am Südpol in-situ Untersuchungen durchgeführt werden sollen, die zeigen, ob Neutrinos im Südpoleis durch akustische Signale nachzuweisen sind.

DESY arbeitet seit mehreren Jahren an einer Studie zum akustischen Neutrinonachweis im Südpol-Eis. Die Materialeigenschaften von Eis lassen erwarten, dass Neutrino-Wechselwirkungen etwa zehnmals stärkere Signale als im Wasser erzeugen und einen geringen Untergrund haben. Die DESY Gruppe hat zu Simulationsrechnungen beigetragen, die zeigen, dass ein $\sim 100 \text{ km}^3$

Detektor aus akustischen und Radio-Sensoren die Ice-Cube umgeben, gute Möglichkeiten hätte, mehr als 10 Neutrino-Ereignisse pro Jahr zu messen, die aus Wechselwirkungen von höchstenergetischen kosmischen Protonen mit Photonen der 2.7 K Hintergrundstrahlung stammen.

Da keine kommerziellen akustischen Sensoren für feste Materialien wie Eis existieren, hat die Zeuthener Gruppe solche *Glaziophone* entwickelt. Kalibrationsmessungen in Wasser und Eis zeigen, dass die Glaziophone ein bis zu 50-fach besseres Signal zu Untergrund-Verhältnis als kommerzielle Hydrophone besitzen.

In der Kollaboration wird der Test von drei Strings mit je sieben akustischen Stationen aus Sensoren und Transmittern im Eis am Südpol für die Saison 2006/07 vorbereitet.

Weitere Ereignisse und Aktivitäten

Im November 2005 wurde der Antrag auf Einrichtung einer HGF-Hochschulnachwuchsgruppe genehmigt, die von DESY und der HGF finanziert wird (Leitung Dr. E. Bernardini). Diese Gruppe wird sich auf das Gebiet der *multi-messenger* Analyse konzentrieren, wobei eine besonders enge Zusammenarbeit mit der MAGIC-Kollaboration angestrebt wird. Die Nachwuchsgruppe ist personell eng mit der DESY-Analyse-Gruppe verknüpft und erweitert das physikalische Spektrum der DESY Gruppe. Frau Bernardini ist gegenwärtig Ko-Leiterin der Punktquellen-Arbeitsgruppe in IceCube. Mit Unterstützung von DESY und der IceCube-Kollaboration gelang es darüber hinaus einer Nachwuchsforscherin ein Emmy-Noether-Stipendium zu erhalten: Dr. E. Resconi, die zuvor über ein Marie-Curie-Fellowship ins DESY eingebunden war und jetzt eine Gruppe am MPI Heidelberg aufbaut. Auch mit dieser Gruppe wird DESY eng zusammenarbeiten.

Die Anbindung des DESY an regionale Hochschulen wurde in zwei ersten Schritten erfolgreich umgesetzt: Prof. H. Kolanoski, Humboldt-Universität Berlin und

DESY, ist seit Ende 2004 Mitglied der IceCube Gruppe. Die HGF-Nachwuchsgruppe stellte eine weitere Verzahnung mit der HUB dar.

Die DESY-Astroteilchengruppe führte im Jahr 2005 drei sehr erfolgreiche Veranstaltungen durch. Auf dem internationalen ARENA Workshop (90 Teilnehmer) im Mai wurden neue Technologien zum Nachweis von Neutrinos vorgestellt und diskutiert, vom Radio- und Akustik-Nachweis bis zum Nachweis über Luftschauer.

Im September wurde das Treffen *Astroteilchenphysik in Deutschland* in Zeuthen durchgeführt (200 Teilnehmer). Dabei wurde ein vollständiger Überblick über alle Projekte auf diesem Gebiet gegeben, an denen deutsche Institutionen beteiligt sind. An dieses Treffen schloss sich ein Workshop von fünfzig Teilnehmern zu multi-messenger Methoden an, auf dem erste konkrete Schritte zur Zusammenarbeit zwischen Experimenten, die unterschiedliche Informationsträger benutzen, diskutiert wurden.

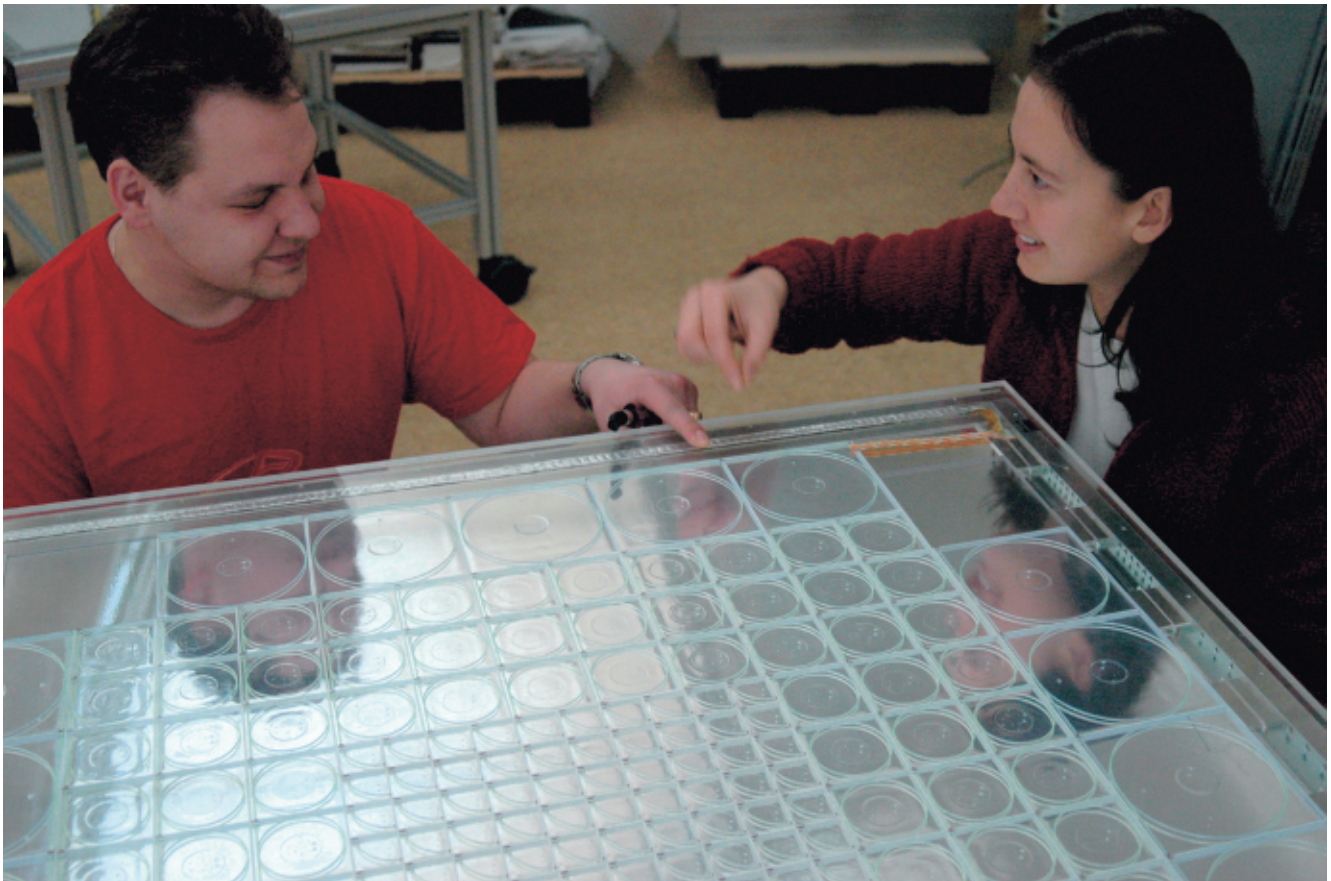


Abbildung 61: Im Laufe des Jahres 2005 wurden die ersten Ebenen des hadronischen Kalorimeter Prototyps am DESY zusammengebaut und in Betrieb genommen. Das Bild zeigt eine der ersten Ebenen nach dem Zusammenbau der Scintillatorplatten, aber vor der Installation der Abdeckung. Im vorderen Teil des Fotos sind die $3 \times 3\text{cm}^2$ großen Scintillatorplatten sichtbar, die von neuartigen Silizium-Photodetektoren ausgelesen werden. Diese Sensoren sind klein genug, dass sie direkt in jeden einzelnen Scintillatorziegel integriert werden können. Für den Prototypen wurde die Grösse der Zellen am Rande angepasst, um die Zahl der Auslesekanäle zu minimieren.

International Linear Collider

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

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

Nach der für DESY äußerst erfreulichen Entscheidung des Jahres 2004, die supraleitende Technologie für den International Linear Collider, ILC, einzusetzen, war das Jahr 2005 davon geprägt, einen effektiven internationalen Organisationsrahmen für den ILC zu bilden. Im Frühjahr wurde auf der LCWS2005 in Stanford B. Barish zum Direktor des neu gegründeten *Global Design Efforts* (GDE) berufen. In den folgenden Monaten stellte er eine etwa 30-köpfige Gruppe von Experten aus aller Welt zusammen, die den Kern des GDE bilden.

Im Sommer fand in Snowmass der zweite ILC Workshop statt, der einer der Höhepunkte des Jahres für den ILC war. Am Ende des Jahres konnte dann das Baseline Configuration Document (BCD) bereitgestellt werden, in dem die grundlegende Konfiguration des Beschleunigers festgelegt wurde.

B. Barish erklärte bei Amtsantritt, dass er das Design der internationalen Anforderung entsprechend von einem virtuellen Büro aus leiten werde. Mitglieder des GDE sind vor allem Experten der verschiedenen Maschinenabschnitte, wobei in der Regel für jeden Themenbereich aus jeder der Regionen Amerika, Asien und Europa jeweils ein Vertreter gewählt wurde. DESY stellt Vertreter in mehreren Bereichen der Maschine, insbesondere bei der supraleitenden Beschleunigertechnologie, und ist im Exekutivbüro des ILC vertreten.

Die ILC-Projektgruppe am DESY hat diese Entwicklungen begleitet. Die von der EU geförderte Designstudie EUROTeV wird von DESY koordiniert und nahm im Januar 2005 ihre wissenschaftliche Arbeit auf. Im Laufe des Jahres konnten sechs Mitarbeiter in Hamburg und Zeuthen eingestellt werden und trugen zu den für den ILC relevanten Maschinenstudien bei.

Große Fortschritte konnten im Laufe des Jahres bei den verschiedenen Detektorentwicklungsarbeiten erzielt werden. Auch hier konnte die internationale Kooperation verstärkt werden. Erste Ergebnisse der Arbeiten wurden verfügbar und konnten auf Konferenzen vorgestellt werden. DESY übernahm eine zentrale Aufgabe in der Koordination eines von drei Detektor Konzepten des ILC, dem *Large Detektor Concept* (LDC), der wesentlich vom TESLA-Detektor abgeleitet worden ist.

Als großer Erfolg, auch für DESY selbst, kann die Bewilligung der EU-Infrastrukturmassnahme EUDET gesehen werden. Wiederum unter der Federführung von DESY wurde hier ein Antrag einer Großzahl europäischer Institute bewilligt, gemeinsam eine Infrastruktur zum Test hochempfindlicher Detektorkomponenten auszubauen und zu nutzen. Bei einem Fördervolumen von 7 M€ über einen Zeitraum von vier Jahren lassen sich so am DESY-Teststrahl und anderweitig anspruchsvolle Entwicklungsprogramme, wie sie für die Detektoren am ILC erforderlich sind, durchführen.

Zwei Forscherinnen waren 2005 erfolgreich in der Einwerbung von Mitteln für Nachwuchsgruppen, die

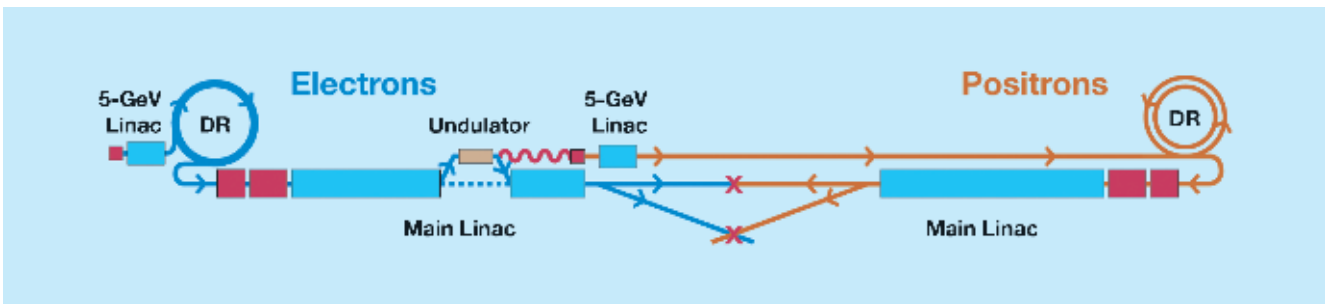


Abbildung 62: Das Layout des ILC gemäß *Baseline Configuration Document (BCD)*

am DESY am ILC angesiedelt werden: Erika Garutti wurde Leiterin einer HGF-Nachwuchsgruppe, die sich mit der Entwicklung eines hadronischen Kalorimeters beschäftigt, und Jenny List erhielt ein Emmy Noether-Stipendium zum Aufbau einer Gruppe im Bereich Polarimetrie und Untersuchungen zur dunklen Materie am ILC. Beide werden zu Beginn des Jahres 2006 ihre Arbeit aufnehmen.

Linearbeschleuniger

Weltweit ist DESY unter den großen Forschungslaboratorien in der vorteilhaften Lage, sowohl den VUV-FEL, eine große Test- und Forschungseinrichtung mit supraleitender Technologie, zu betreiben, als auch ein vielfach größeres Projekt, den XFEL, zur Bewilligungsreife zu führen, das auf gleicher Technologie beruht. Praktische Erfahrung zur Fertigung und Optimierung der supraleitenden Hohlraumresonatoren kann also direkt bei DESY gewonnen werden. Mehrere Besucher aus Japan und Amerika, wo solche Testanlagen erst im Aufbau sind, besuchten DESY im Laufe des Jahres. Ein Industrieforum, *European Industry Forum for Accelerators with SCRF Technology (EIFast)*, wurde im Laufe des Jahres mit dem Ziel gegründet, Firmen die Gelegenheit zu geben, sich auf die Produktion der Resonatoren und Komponenten für die nächsten, größeren Beschleunigerprojekte vorzubereiten. Wegen seiner großen Stückzahl nimmt der ILC dabei eine besondere Rolle ein.

Die neu gegründete ILC-Arbeitsgruppe formierte sich im Laufe des Jahres 2005. Finanziert durch die Eu-

ropäische Kommission im Rahmen des EUROTeV Projektes konnten mehrere Mitarbeiter bei DESY eingestellt werden und ihre Arbeit aufnehmen. DESY koordiniert dieses Projekt. Das ILC-Projekt selbst fand große Beachtung auch in Brüssel selbst. Der EUROTeV-Koordinator wurde eingeladen, das ILC-Projekt als eines der führenden Großprojekte der internationalen Forschung auf einem Treffen des *European Strategy Forum for Research Infrastructure (ESFRI)* in Nottingham darzustellen.

Auslegung des Beschleunigers

Das gegenwärtige Layout des ILC gemäß *Baseline Configuration Document (BCD)* ist in Abbildung 62 gezeigt. Auf einer Strecke von etwas mehr als 30 km wird eine Gesamtenergie von 500 GeV erreicht. Der Tunnel für eine spätere Ausbaustufe in den TeV-Bereich wird zunächst nicht gebaut, allerdings in den Planungen bereits berücksichtigt. Hier wird erwartet, dass mit den Produktionserfahrungen aus der ersten Phase auch höhere Beschleunigungsgradienten zum Einsatz kommen können. Die schematische Zeichnung lässt auch die Position des Undulators zur Erzeugung von Positronen erkennen.

Entwicklung der supraleitenden Technologie

Supraleitende Hohlraumresonatoren sind für den ILC in großer Stückzahl (20000) erforderlich. Die Optimie-

nung der Eigenschaften der Resonatoren ist deshalb eine Schlüsselaufgabe. Ein wichtiger Parameter in diesem Zusammenhang ist der nominelle Beschleunigungsgradient, über den auf dem Snowmass Workshop beraten wurde; im Mittel sollen die Resonatoren einen Gradienten von 31.5 MV/m bei hoher Güte im Strahlbetrieb erreichen. Das ist deutlich mehr als gegenwärtig für den XFEL bei DESY vorgesehen ist und erfordert ein intensives Forschungsprogramm. Amerikanische und japanische Institute haben diese Herausforderung erkannt und bauen gegenwärtig eine entsprechende Infrastruktur auf. DESY versucht gleichzeitig, die Begrenzungen im Fertigungsprozess zu erkennen. Kritischer Parameter bleibt dabei die Reinheit der Oberflächen. Immer wieder kommt es durch einzelne Unregelmäßigkeiten an der Niobium-Oberfläche zur Feldemission und damit zum vorzeitigen Zusammenbruch der Beschleunigerspannung. Ein gewisser Vorteil scheint sich bei Resonatoren, die aus einem Niobium-Einzelkristall geformt werden, abzuzeichnen. Hier ist die Zahl der Korngrenzen von vornherein reduziert. Eine ausreichende Anzahl von Hochgradienten-Resonatoren für ein Modul wird bei DESY voraussichtlich im Jahr 2006 zur Verfügung stehen. Auf der mechanischen Seite der Modulkonstruktion wurde als Ziel für den ILC das Modul der 4. Generation definiert. Hier ist vorgesehen, in der Mitte zwischen den Hohlraumresonatoren einen supraleitenden Quadrupol für die Strahloptik in den Kryostaten einzubauen. Weitere Elemente, wie z. B. piezo-getriebene Tuner, die der elektromagnetischen Verstimmung der Resonatoren entgegenwirken, werden in Zusammenarbeit mit mehreren europäischen Labors perfektioniert. Die Steuerelektronik, die in schnellen Regelkreisen den Phasenvorschub jedes einzelnen Resonators kontrolliert, wurde getestet und weiterentwickelt.

Dämpfungsringe

Der kurze Abstand (200 ms) zwischen Strahlzügen des ILC macht eine schnelle Kühlung der Strahlen im Dämpfungsring nötig. Dies kann nur über entsprechende Wiggler-Strecken erreicht werden. Der Krümmungsradius des ILC-Dämpfungsringes hat dementsprechend

nur eine untergeordnete Rolle bei der Festlegung der Dämpfungszeit. Zwei Alternativen für die Auslegung der Dämpfungsringe wurden während des Snowmass Workshops intensiv diskutiert: ein so genannter Dogbone Ring, der in Anlehnung an den TESLA-Vorschlag die Länge des Linac-Tunnels zur Speicherung der 3000 Strahlpakete ausnutzt, und ein dicht-gepackter Kreisring von 6 km Umfang. Kürzliche Erfolge in der Entwicklung schneller Ejektions-Kickermagnete (3 ns) lassen auch solche Designs als möglich erscheinen. Während des GDE Meetings in Frascati im November konnte deshalb die Entscheidung zugunsten eines 6 km Rings gefällt werden. Es bleiben jedoch noch einige Fragen offen: kann das Vakuumsystem und die Beschichtung der Strahlrohre so ausgelegt werden, dass freigesetzte Elektronen die Emittanz des Positronenstrahls nicht zerstören? Kann der Elektronenstrahl durch freigesetzte Ionen selbst instabil werden? Sicherheitshalber wurde für den Positronenstrahl vorgesehen, einen Doppelling (Gesamtlänge 12 km) im 6 km langen Tunnel vorzusehen. Intensive Studien und Simulationsarbeiten sind zur endgültigen Klärung der Machbarkeit erforderlich. DESY Mitarbeiter sind in diesen Arbeiten direkt involviert.

Strahldynamik und Physik

Mehrere Studien wurden im Rahmen des EUROTeV Projektes zur Strahldynamik angestellt. Zur Erreichung des Luminositätsziels von $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ werden extrem flache Strahlen zur Kollision gebracht. Die Bewahrung der vertikalen Emittanz beim Ausgang aus dem Dämpfungsring ist deshalb extrem wichtig. Mehrere konstruktionstechnische und betriebsbedingte Gründe legen nahe, den Tunnel der Erdkrümmung folgen zu lassen, was einer vertikalen Ablenkung von mehr als 1 mrad entspricht. In einer gezielten Studie konnte gezeigt werden, dass die durch Kopplung mit der horizontalen Ebene induzierten Emittanzaufweitungen beherrschbar bleiben und die Luminosität bei einer Bauweise längs der Erdoberfläche nicht nachteilig beeinflussen werden. Weiterhin sind Studien unterwegs, die das Kollimationsverfahren beim ILC untersuchen.

Positronenquelle

Nach ausgiebigen Vorarbeiten und Studien zur Positronenquelle wurde im Workshop in Snowmass entschieden, Positronen mit einem 100–200 m langen, wendelförmigen Undulator zu erzeugen. Dies ist der Vorschlag, der bereits grundsätzlich für den TESLA TDR ausgearbeitet worden war. Die Materialbelastung für das (dünne) Target ist in diesem Fall deutlich kleiner als für ein konventionelles Target, das als Alternative diskutiert wurde. Die guten Strahleigenschaften einer Undulatorquelle erleichtern den Einfang der Teilchenpakete am Dämpfungsring. Darüberhinaus bietet ein wendelförmiger Undulator den Vorteil, dass auch der Positronenstrahl polarisiert werden kann. Der Elektronenstrahl ist bereits von der Quelle her polarisiert.

Global Accelerator Network

Gute Fortschritte gab es in der Arbeitsgruppe, die sich mit dem ferngesteuerten Betrieb von Beschleunigerkomponenten beschäftigt. Zunächst wurde in einer umfassenden Nutzerumfrage das genaue Anforderungsprofil für einen zuverlässigen ferngesteuerten Betrieb von Hardware-Komponenten festgestellt. Ausgehend von diesen Ergebnissen konnte die Spezifikation geeigneter Konfigurationen angegangen werden. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut wurde ein moderner Video-CODEC zur Übertragung der Audio-Video-Informationen zur Nutzung definiert. In einem Demonstrationsexperiment konnte eine Strahlinjektion in den Beschleuniger des ELETTRA-Synchrotrons in Trieste von einem Hamburger Arbeitsplatz aus vorgenommen werden. Diese virtuelle Präsenz an einem weitentfernten Beschleuniger wird in anderen Aspekten verfeinert. Dazu gehören unter anderem der standardisierte Zugriff auf Messinstrumente über Webseiten, die nach entsprechender Authentifizierung weltweit zur Verfügung stehen. Weitere Schritte in dieser Richtung werden die internationale Zusammenarbeit am Beschleuniger erleichtern und haben große Bedeutung bei der Aufteilung der Aufgaben.

Verfügbarkeit des Beschleunigers

Der ILC wird an einigen Stellen Komponenten in einer solchen Anzahl verwenden, dass ein stochastischer Zugang zur Untersuchung der Betriebssicherheit angebracht ist. Bei 20 000 Hohlraumresonatoren und mehreren tausend Magneten ist es nahliegend, die Auslegung des Maschinenkomplexes auch hinsichtlich der Verlässlichkeit zu untersuchen. Insbesondere lässt sich mit solchen Studien feststellen, an welchen Stellen Redundanz im System das Betriebsergebnis deutlich verbessert. Ein kleiner Ausschnitt einer solchen Simulation ist in Abbildung 63 gezeigt. Als Ergebnis solcher Studien, die am SLAC (Stanford) initiiert wurden, konnte durch Studien am DESY gezeigt werden, dass eine undulatorbasierte Positronenquelle quasi gleiche Verfügbarkeit erreicht wie eine konventielle (auf einem dicken Target basierende) Quelle, auch wenn für die Positronenerzeugung in diesem Fall der Elektronenweg verfügbar sein muss. Ein zweiter Tunnel erhöht die Verfügbarkeit

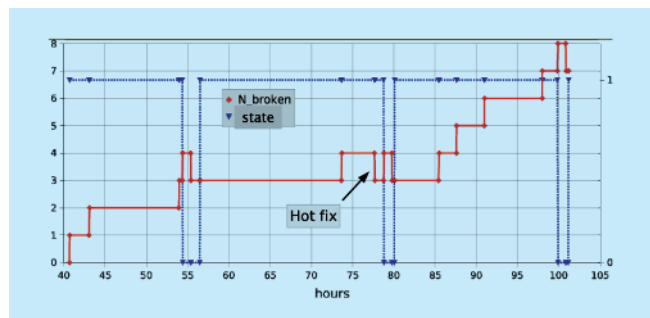


Abbildung 63: Die Zahl der ausgefallenen Komponenten während eines simulierten Betriebslaufs des ILC. Die rote Kurve zeigt die Ausfälle (N_{broken}), die blaue Kurve den Betriebszustand (0 oder 1, rechte Skala) des Colliders. In diesem Beispiel kommt es nach etwa 55 h zu kritischen Ausfällen, die zur Abschaltung und Reparatur des ILC führen. Wegen der Redundanz (bei kritischen Komponenten) müssen nicht alle Komponenten vor Betriebswiederaufnahme repariert werden. Obwohl Ausfälle verbleiben, kann der Beschleuniger in diesem Beispiel nach kurzer Zeit wieder betrieben werden (Betriebszustand 1).

des Colliders um mehr als 10%, wenn im Servicetunnel der Zugang auch während des Betriebs des Colliders möglich ist. Die Annahmen, die diesen Simulationsstudien zugrunde liegen, sind z. T. jedoch ad hoc. Bei DESY wurde versucht, durch Vergleich mit existierenden Anlagen die Zahlen in anderen Anwendungen zu reproduzieren. Dabei zeigte sich, dass die Annahmen zu den Zeiten der Beschleunigeroptimierung nach einer Betriebsstörung zumindest beim Vergleich mit HERA Daten zu deutlich anderen Zeiten der Verfügbarkeit des ILC führen würden. Es wird offensichtlich, dass die Ergebnisse dieser Studien mit Bedacht zu nutzen sind und jeweils anderen Optimierungsaspekten gegenüber gestellt werden müssen.

Ein Photon-Collider am ILC

Zu den viel diskutierten Erweiterungsoptionen für den ILC zählt der $\gamma\gamma$ -Collider, bei dem die Strahlen kurz vor dem Wechselwirkungspunkt mit jeweils einem Laserstrahl kollidieren. Durch Comptonstreuung werden dabei Photonen mit maximal 80% der Elektronenenergie erzeugt, die im Wechselwirkungspunkt kollidieren.

Das schwierigste Problem beim $\gamma\gamma$ Collider ist der Bau des Hochleistungslasers. Für die Kollision mit den Elektronenpaketen werden Laserpulse von ca. 10 J Energie, ein bis zwei Pikosekunden Dauer und der Zeitstruktur des Beschleunigers gebraucht. Mit Hilfe eines Ringresonators kann die Laserenergie zwischengespeichert und damit die Leistungsanforderung an den Laser um zwei Größenordnungen verringert werden. Ein detaillierter Entwurf eines solchen Resonators wurde in Zeuthen ausgearbeitet und publiziert. Es stellte sich heraus, dass ein solcher Resonator im Prinzip gebaut werden kann, jedoch enorme Anforderungen an die Justiertoleranzen stellt.

In Zeuthen wurde die Machbarkeit der $\gamma\gamma$ -Option untersucht und Studien zur physikalischen Motivation ange stellt. Die wichtigsten Ergebnisse sind publiziert, eine abschließende Veröffentlichung ist in Vorbereitung.

Polarisierte Positronenquelle am ILC: E166

Ein Linearbeschleuniger, in dem sowohl Elektronen als auch Positronen polarisiert sind, hat ein besonders breites Physikpotenzial. Die Erzeugung polarisierter Elektronen durch Photoemission an geeigneten GaAs-Strukturen ist inzwischen ein wohletablierter Prozess, bei dem hohe Polarisationsgrade erreicht werden. Die Erzeugung eines polarisierten Positronenstrahls mit vergleichbarer Intensität ist hingegen eine völlig neue Herausforderung.

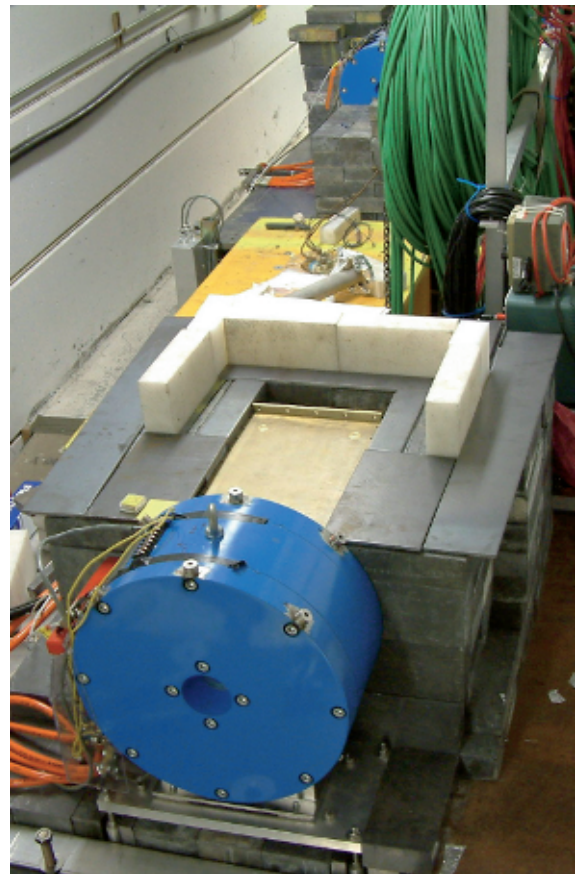


Abbildung 64: E166 Experiment im SLAC FFTB Tunnel. Im Vordergrund ist der Analysiermagnet für die Positronen zu sehen. Unmittelbar dahinter steht der CsI-Detektor inmitten der hier noch im Aufbau befindlichen massiven Abschirmung. Im Hintergrund ist der Analysiermagnet für die Photonen zu sehen.

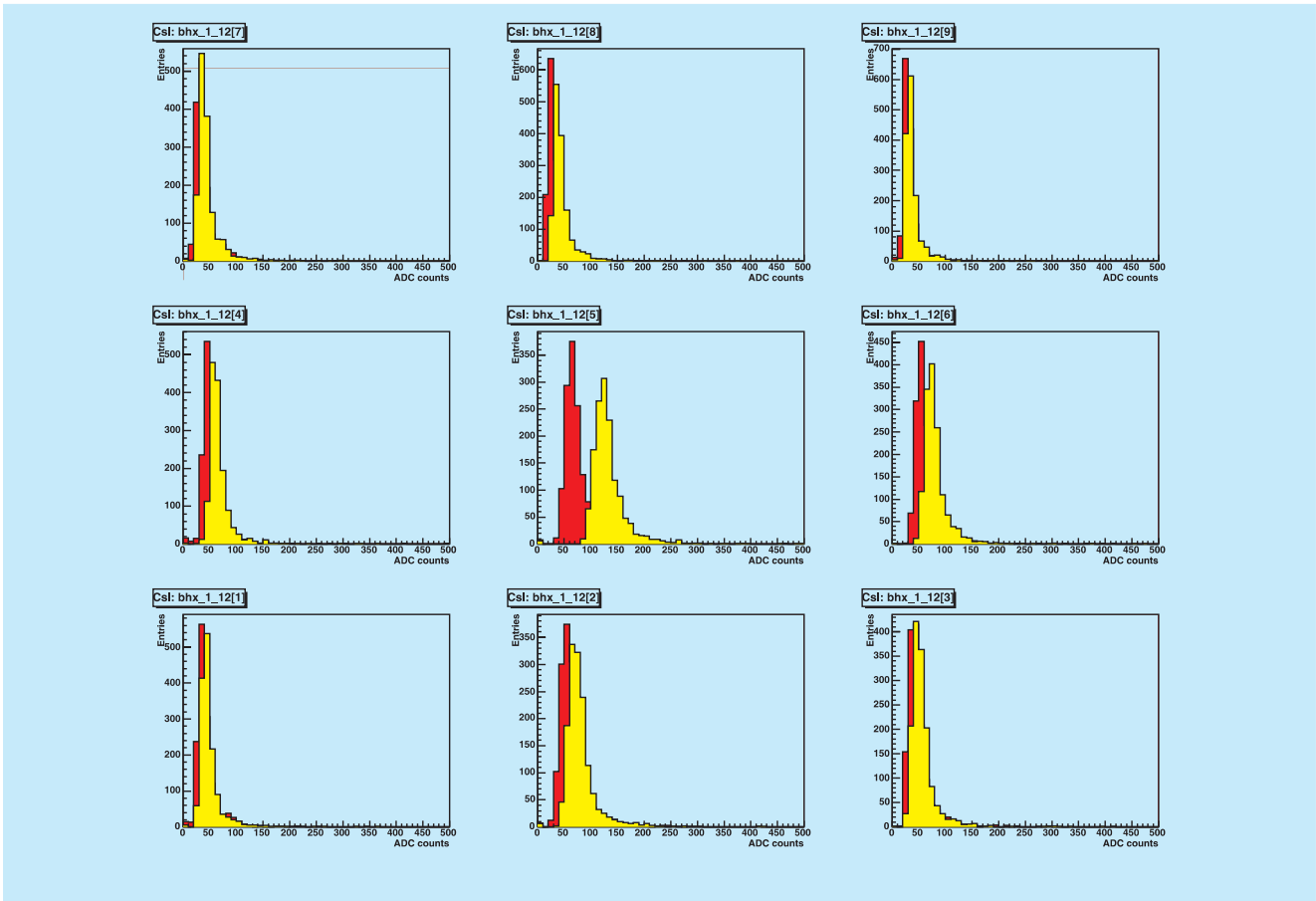


Abbildung 65: Die Signal- (hell) und Untergrundereignisse (dunkel) gemessen in den in einer 3×3 Matrix angeordneten CsI(Tl)-Kristallen des Kalorimeters für eine Magnetisierungsrichtung des Eisen im Analysiermagneten. Die Kristalle haben eine Größe von je $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$; die rückkonvertierten Photonen treffen vor allem den zentralen Kristall.

Mit dem E166 Experiment am SLAC wurde erstmals die Produktion polarisierter Positronen mit einem helikalen Undulator experimentell demonstriert. Diese Methode geht auf eine Arbeit von Balakin und Mikhailichenko aus dem Jahre 1979 zurück. Ein hochenergetischer Elektronenstrahl wird durch einen helikalen Undulator geschickt. Dabei entsteht zirkular polarisierte Gammastrahlung, die hinter dem Undulator auf ein dünnes Target trifft und Elektron-Positron Paare erzeugt. Die Polarisation der Undulatorphotonen überträgt sich dabei auf die von der nachfolgenden Strahloptik eingefangenen hochenergetischen Positronen, die Polarisationsgrade von bis zu 60% erreichen können. Obwohl die Strahlenergie am FFTB deutlich

niedriger ist als die am ILC, kann durch geeignete Wahl der Parameter des Undulators erreicht werden, dass die Wellenlänge der Photonen die gleiche ist wie am ILC, und damit die Ergebnisse übertragbar werden.

E166 wurde am SLAC unter internationaler Beteiligung durchgeführt. DESY hatte die Verantwortung für die Polarimetrie der Positronen. Das Polarimeter besteht aus einem Analysiermagneten (Verantwortung DESY Hamburg) und einem CsI(Tl) Kalorimeter (Verantwortung DESY Zeuthen), siehe Abbildung 64. Die Polarisation der Positronen wird aus der gemessenen Asymmetrie der Kalorimetersignale bestimmt. Ein weiterer

Analysiermagnet wurde zur Messung der Polarisierung der Undulatorphotonen eingesetzt.

Ein schwerer elektrischer Unfall am SLAC im Herbst 2004 führte auch beim Experiment E166 zu langen Verzögerungen und erst im Juni 2005 konnte mit einem 4-wöchigen Strahlbetrieb für E166 begonnen werden.

Alle Komponenten des Experimentes arbeiteten sehr gut. Der helikale Undulator wurde erfolgreich in Betrieb genommen und es gelang, die Position und Ausrichtung so zu steuern, dass der Elektronenstrahl ohne wesentliche Verluste hindurchgeführt werden konnte. Eine entscheidende Voraussetzung hierfür ist die vorzügliche Strahlemittanz im SLAC FFTB, da der Undulatorkanal sehr eng ist ($0.9\text{ mm } \varnothing \times 1\text{ m}$). Die Datennahme erfolgte bei 46.6 GeV typischerweise mit 10 Hz, wobei jeder zweite Maschinenpuls für Untergrundmessungen verwendet wurde, indem der Undulator gegenüber der Maschine zeitlich verzögert gepulst wurde. Die Analysiermagnete wurden automatisch unter Computerkontrolle nach jeweils 3000 Maschinenpulsen umgepolt. Die Strahlqualität wurde fortlaufend durch Beobachtung verschiedener Untergrundsignale überwacht.

Abbildung 65 zeigt die im CsI-Kalorimeter gemessenen Signale und den Untergrund für alle 9 Kristalle. Aus diesen Messungen wurden dann die Asymmetrien im Transmissionsverhalten der zu Photonen konvertierten Positronen gemessen, sie betragen wie erwartet etwa 1%. In einer zweiten, 6-wöchigen, Runperiode von Anfang September bis Oktober 2005 wurde das Polarisationspektrum bei verschiedenen Positronenenergien ausgemessen. Die Analyse der Messergebnisse ist noch in Arbeit, die vorläufigen Resultate sind in Abbildung 66 zusammengefasst: Der erwartete Polarisationsgrad der Positronen wächst mit deren Energie, entsprechend sind auch die Asymmetrien des Transmissionsignals energieabhängig. Die Messungen stimmen gut mit den erwarteten Asymmetrien überein. Zum Vergleich wurde außerdem die Asymmetrie für die Elektronen bei 6 MeV gemessen, die im Target bei der Paarbildung entstehen.

Um aus den gemessenen Asymmetrien den Polarisationsgrad der Positronen zu bestimmen, braucht man eine

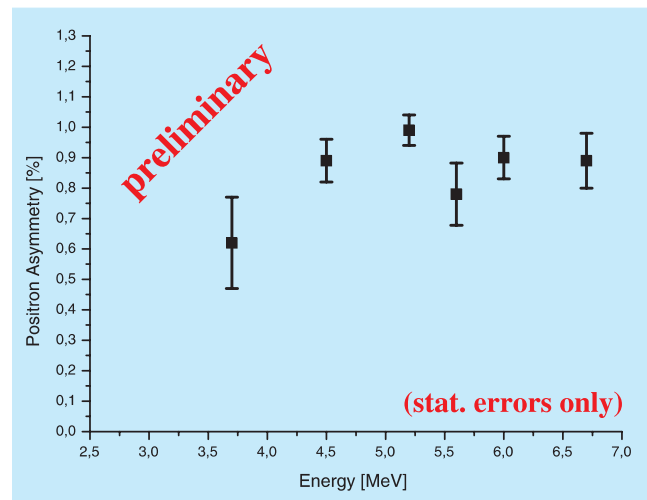


Abbildung 66: Die Asymmetrien gemessen mit dem Compton-Transmissionspolarimeter bei E166 in Abhängigkeit von der Energie der Positronen. Die Energie wurde mit einem Doppeldipolspektrometer eingestellt. Aus den gemessenen Asymmetrien und der bekannten Magnetisierung im Eisen kann die Polarisierung der Positronen berechnet werden, wenn die Spinabhängigkeit der Photonentransmission (Analyzing Power) mit einer Monte Carlo Simulation bestimmt wurde.

detaillierte Simulation sämtlicher Prozesse, die zum gemessenen Signal beitragen können, und zwar unter besonderer Berücksichtigung von spinabhängigen Aspekten. Zur Untersuchung der allgemeinen Messmethode und zur Entwicklung des experimentellen Aufbaus war zunächst in Hamburg ein modifizierter GEANT3 Code entwickelt worden. Eine entsprechende Polarisationserweiterung von GEANT4 wird in Zeuthen realisiert. Compton-, Møller- und Bhabha-Streuung wurden bereits implementiert, die Einbindung der polarisationsabhängigen Paar-Produktion und Bremsstrahlung ist noch in Arbeit.

Arbeiten zur Messung der Strahlenergie am ILC

Die Messung der Strahlenergie (E_b) am ILC mit einer Genauigkeit von 10^{-4} oder besser ist notwendig, um

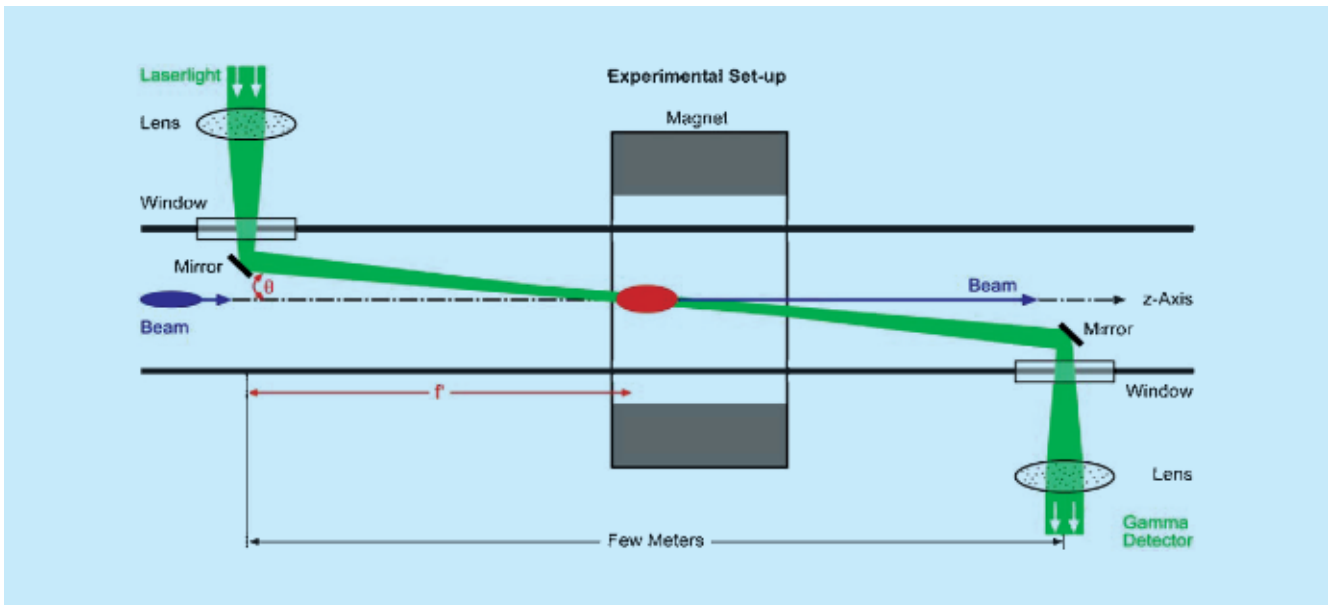


Abbildung 67: Prinzip der Messung der Strahlenergie mittels Resonanzabsorption von Laserlicht in einem statischen Magnetfeld.

Massen von z. B. Higgs-Bosonen oder vom Top-Quark mit einer Präzision zu bestimmen, die kleiner ist als die theoretischen Unsicherheiten. Die Standardmethode zur Bestimmung von E_b ist die Nutzung einer Magnetschikane ergänzt durch Strahltagemonitore (BPMs) sehr hoher Positionsgenauigkeit. Diese Möglichkeit wurde im zurückliegenden Jahr ausführlich untersucht und in einem LC Report Anfang 2005 dokumentiert. Im nächsten wichtigen Schritt ist nachzuweisen, dass unter realen Strahlbedingungen die geforderte Genauigkeit von 10^{-4} erreichbar ist. Dazu ist ein Experiment am SLAC (USA) in Vorbereitung mit dem Ziel, Stabilitätsprobleme eines BPM-Spektrometers und Eigenschaften der Monitore mit zugehöriger Elektronik zu untersuchen. Dieses Experiment wird im Rahmen einer internationalen Kollaboration durchgeführt. Ergebnisse werden im Herbst 2006 erwartet.

Neben dieser Art der Strahlenergiemessung werden in Zeuthen komplementäre Methoden zur Bestimmung von E_b betrachtet. Hierzu gehört die Möglichkeit, die Energie mittels Resonanzabsorption von Laserlicht in einem statischen Magnetfeld zu bestimmen. Bei Kenntnis der Stärke des Magnetfeldes und der Länge des

Magneten, sowie der Frequenz des Laserlichts und seiner Einfallrichtung ist im Fall maximaler Lichtabsorption die Energie des Strahls bestimmbar. Der Schritt von rein theoretischen Betrachtungen und Fragestellungen zu einem praktischen Konzeptionsvorschlag wurde 2005 vollzogen, siehe auch Abbildung 67. Trotz einer Reihe offener Probleme schlugen Kollegen aus Yerevan vor, ein *proof-of-principle* Experiment in 2007 und 2008 am dortigen Beschleuniger durchzuführen.

Ein anderer Zugang zur Bestimmung der Strahlenergie basiert auf der Nutzung der Synchrotronstrahlung, die in den Dipolmagneten der Magnetschikane generiert wird. Erste Simulationsrechnungen zeigen, dass eine präzise Messung der Breite der Synchrotronstrahlung eine Genauigkeit der Strahlenergie von bis zu $5 \cdot 10^{-5}$ erlaubt. Die Entwicklung notwendiger Detektoren zur Messung dieser Strahlung (für z. B. Photonen mit Energien unter 20 keV) mit einer Ortsauflösung von wenigen Mikrometern wird gegenwärtig mit Kollegen vom VIK Dubna verfolgt.

Die Möglichkeit der Messung der Strahlenergie mittels inverser Comptonstreuung wird ebenfalls betrach-

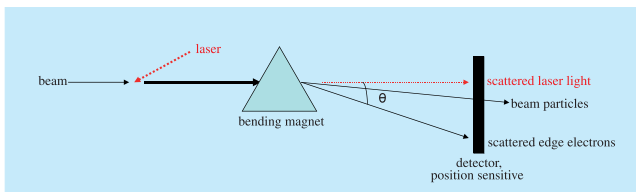


Abbildung 68: Skizze zur Bestimmung der Strahlenergie mittels inverser Comptonstreuung.

tet. Sie beruht auf der Bestimmung der Position der gestreuten *Kantenelektronen* nach Durchlaufen eines Dipols relativ zur Richtung der gestreuten vorwärtslaufenden Photonen (Abbildung 68). Die Kantenposition der Elektronen hängt von E_b ab, und ihre Bestimmung mit einer Genauigkeit von etwa $5\ \mu\text{m}$ ermöglicht, die geforderte Präzision der Strahlenergie zu erreichen.

Diese hier aufgezeigten Möglichkeiten zur Bestimmung der Strahlenergie sind vielversprechend und werden gemeinsam mit Kollegen in Dubna und Yerevan weiter verfolgt. Sie dienen in erster Linie als Kontrollmessung der Strahlenergie mit Hilfe eines auf Strahllagemonitoren basierten Spektrometers.

Detektorentwicklungen für den ILC

Zur Vorbereitung des Experimentierprogrammes am ILC werden verschiedene Detektorkonzepte weltweit entwickelt. Basierend auf dem TESLA Detektor Konzept, welches ausführlich im TESLA TDR diskutiert worden ist, wurde das *Large Detektor Concept* unter wesentlicher Mitarbeit von DESY Physikern entwickelt und auf der LCWS2005-Konferenz erstmalig der Fachwelt vorgestellt. Daneben ist DESY an drei internationalen Detektor R&D Kollaborationen beteiligt, in denen wesentliche Komponenten eines Detektors am ILC entwickelt werden: LC-TPC, einer Kooperation von etwa 30 Instituten, die sich die Entwicklung einer TPC für den ILC auf die Fahnen geschrieben haben, CALICE, eine Kollaboration zur Entwicklung von Kalorimetern am ILC, und FCAL, einer Gruppe von Instituten, die sich mit der Planung von besonders schnellen und strahlenharten Kalorimetern im Vorwärtsbereich des Detektors beschäftigen.

Eine Zeit-Projektions-Kammer für den ILC

In einigen der Konzepte für einen Detektor am ILC ist eine Zeit-Projektions-Kammer (TPC) als Teil des zentralen Spurrekonstruktionssystems vorgesehen. Bereits seit einigen Jahren wird am DESY eine neuartige Form einer TPC entwickelt, die auf der Auslese mit *Gas Electron Multipliern* (GEM) basiert.

In enger Zusammenarbeit mit anderen Instituten in Deutschland, Frankreich und Kanada wurden in den vergangenen Jahren grundlegende Versuche zum Einsatz von GEMs in einer TPC mit vielversprechenden Resultaten durchgeführt.

Auflösungsstudien

Mit einem im Jahr 2003 entwickelten und gebauten Prototyp (Abbildung 69) wurden im vergangenen Jahr eine Reihe von Messungen mit kosmischen Muonen in hohen Magnetfeldern durchgeführt. Hierzu wurde die DESY Hoch-Magnetfeld-Testanlage genutzt. Ziel der im Jahr 2005 durchgeführten Untersuchung der gewonnenen Daten ist die Bestimmung des räumlichen Auflösungsvermögens und der Entwicklung geeigneter Methoden zur Rekonstruktion der Ereignisse. Das von den GEMs auf der Auslesefläche generierte Signal ist wesentlich schmaler als das herkömmlicher Gasverstärkungs-Systeme, die auf Violdraht-Proportionalkammern basieren. Die Größe der Auslesestrukturen (Pads) kann nicht beliebig verkleinert wer-

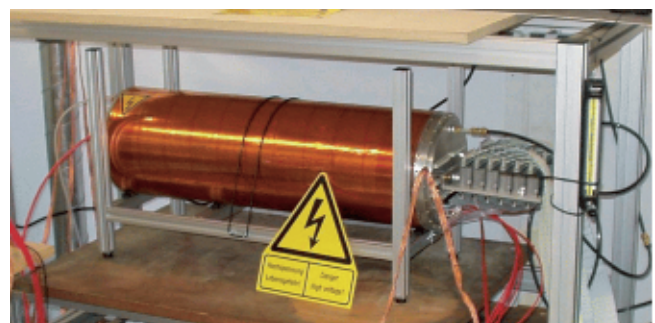


Abbildung 69: TPC Prototyp, der für den Einsatz in der Hoch-Magnetfeld-Testanlage am DESY konstruiert wurde.

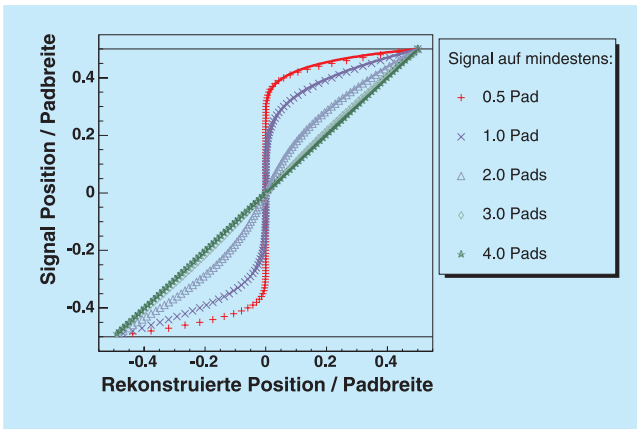


Abbildung 70: Pad-Antwort-Funktion für verschiedene Signalbreiten

den, da dies die Anzahl der Kanäle und damit die Kosten stark erhöht. Um das Verhältnis zwischen Signal und Auslesestruktur zu optimieren, wurden Methoden untersucht, die die auftretenden Systematiken berücksichtigen und soweit möglich korrigieren. Hierbei ist die Pad-Antwort-Funktion (PRF), die in Abbildung 70 gezeigt ist, von zentraler Bedeutung. Diese Funktion stellt die wahre Signalposition in Relation zur rekonstruierten Position dar. Es ist deutlich zu sehen, dass bei einem kleinen Verhältnis von Signalbreite zur Breite des Pads die PRF einen flachen Bereich aufweist. Dies bedeutet, dass nur ein Pad aktiv ist, und somit die tatsächliche Position der Ladung auf dem Pad nicht

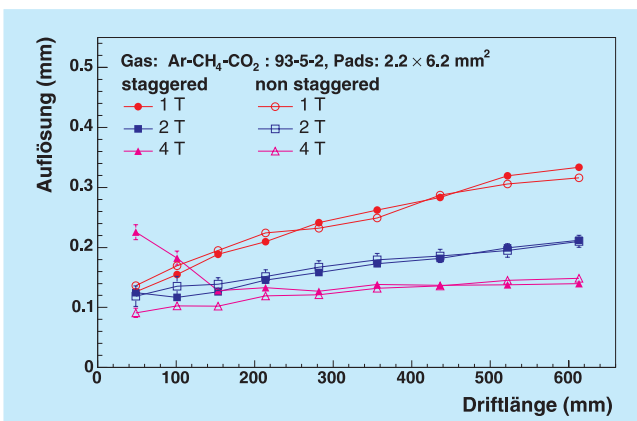


Abbildung 71: Räumliches Auflösungsvermögen einer TPC in transversaler Richtung als Funktion der Driftlänge und des Magnetfeldes.

mehr ermittelt werden kann. Ebenfalls ist zu erkennen, dass bei genügender Signalbreite die PRF durch eine Gerade dargestellt werden kann und somit keine Korrektur notwendig ist. Abbildung 71 zeigt die mit der Korrektur der PRF ermittelte Auflösung der TPC. Sehr dicht an der Anode erreicht die Kammer eine Auflösung von etwa 100 μm und damit das für den ILC gesetzte Ziel.

Laser

Neben dem Ortsauflösungsvermögen ist eine weitere wichtige Größe einer TPC die Doppelspurtrennung. Diese wird im Labor mit Hilfe eines UV-Lasers untersucht. Ein UV-Laser erzeugt Spuren in einem Argon basierten Gemisch, die ähnlich denen realer Teilchen sind. Der Laserstrahl wird mit einem Teleskop in das sensitive Volumen der Kammer fokussiert. Vor Eintritt in das Gasvolumen wird der Strahl mit einem Strahlteiler in zwei Strahlen aufgeteilt. Aus dem bekannten Abstand der Spuren in der Kammer kann dann die Doppelspurauflösung bestimmt werden. Erste Messreihen sind durchgeführt worden und werden im Moment analysiert.

Bei der Untersuchung der Doppelspurtrennung transversal zur Driftrichtung muss der Einfluss des Magnet-

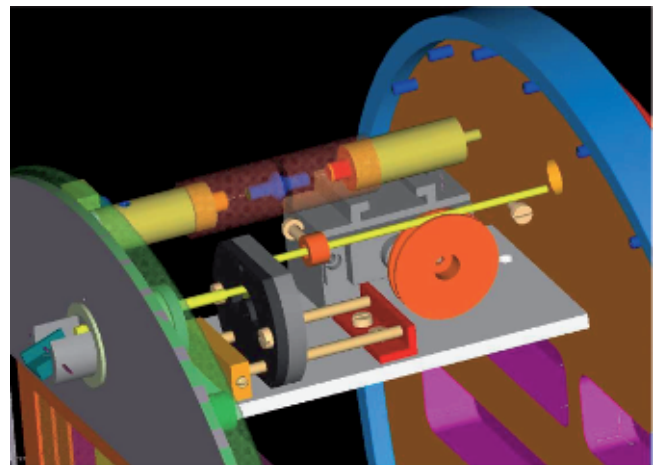


Abbildung 72: Laserpositionierungssystem: Modifikation des TPC-Prototyps zu Messung der Doppelspurauflösung in hohen Magnetfeldern.

feldes berücksichtigt werden. Deshalb wird zurzeit der Prototyp, der für den Einsatz im Magnet entwickelt wurde, modifiziert. Hierzu wurde die Kathodenseite mit einem Fenster zur Einkopplung des Lasers versehen. Für die Ausleseseite wurde ein Positionierungssystem (siehe Abbildung 72) entwickelt, welches den Strahlteiler hält und eine Positionierung während des Betriebs der Kammer ermöglicht.

Messung der Driftgeschwindigkeit

Mit Hilfe des Lasers wurde eine Messung der Driftgeschwindigkeit für verschiedene Gase und unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Für die Messung wurden zwei parallele Laserstrahlen bekannten Abstands gleichzeitig durch verschiedene Fenster in die Kammer geleitet. Durch Messung der Zeitdifferenz zwischen den so erzeugten Signalen kann die Driftgeschwindigkeit bestimmt werden. Abbildung 73 zeigt die Ergebnisse dieser Messung für verschiedene Stärken des Driftfeldes. Ebenfalls eingezeichnet sind

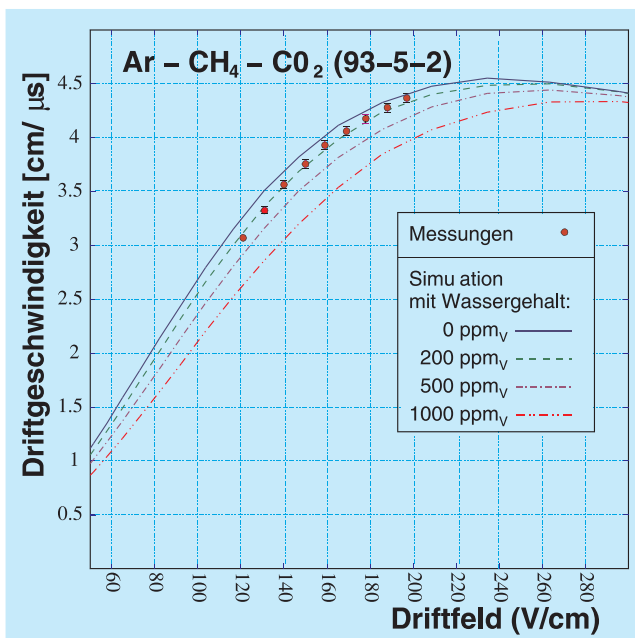


Abbildung 73: Driftgeschwindigkeit versus Driftfeld für Ar-CH₄-CO₂ (93-5-2): Gezeigt sind Messung und Vorhersagen durch eine Garfield-Simulation für verschiedene Anteile Wasser im Gas.

die Vorhersagen für verschiedene Mengen von Verunreinigungen durch Wasser bis 1000 ppm_v. Durch den Vergleich der Messungen mit den Vorhersagen kann indirekt der Wassergehalt zu (150^{+70}_{-50}) ppm_v bestimmt werden. Dies stimmt im Rahmen der Messgenauigkeit mit der direkten Messung des Wassergehaltes mit dem Slow-Control-System überein. Ein solches Slow-Control-System wurde im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt. Es dient der Überwachung und Kontrolle wichtiger Parameter der TPC. Hierzu zählen neben Hochspannungseinstellungen und Magnetfeld auch Gasparameter wie Druck, Temperatur und der Menge an Verunreinigungen durch Wasser und Sauerstoff.

Ein Hadronisches Kalorimeter für den ILC

Studien haben gezeigt, dass Präzisionsmessungen vieler Schlüsselreaktionen am geplanten Internationalen Linearbeschleuniger (ILC) ein hadronisches Kalorimeter mit hoher Zellgranularität erfordern. Die Gruppe FLC entwickelt einen Prototyp eines solchen Kalorimeters, der aus abwechselnd geschichteten Lagen von Stahlplatten und Scintillatorziegeln besteht. Das von durchquerenden Teilchen in den Ziegeln erzeugte Licht wird mit neuartigen Halbleiterdetektoren (SiPM, Silicon Photomultiplier) ausgelesen, die aufgrund ihrer geringen Größe von nur einem Quadratmillimeter direkt auf den quadratischen, neun Quadratzentimeter großen Ziegeln montiert sind.

Der Prototyp besteht aus 38 Scintillationslagen, die jeweils 216 Zellen umfassen. Im Jahre 2005 wurden bei DESY sechs Lagen fertig gestellt. Abbildung 74 zeigt die Anordnung der Scintillatorziegeln mit der feinen Granularität im Zentrum und nach außen größerer Zellstruktur. Die Produktion der restlichen Lagen ist für 2006 vorgesehen. Im Sommer 2006 soll der Prototyp bei CERN mit Hadronen bestrahlt werden, um die Funktionalität zu testen und um wichtige Informationen über die Entwicklung hadronischer Schauer zu erhalten, die zur Optimierung des Kalorimeters für den ILC benötigt werden.

Mit den produzierten Lagen wurden erfolgreich Bestrahlungen mit Positronen aus dem Beschleuniger

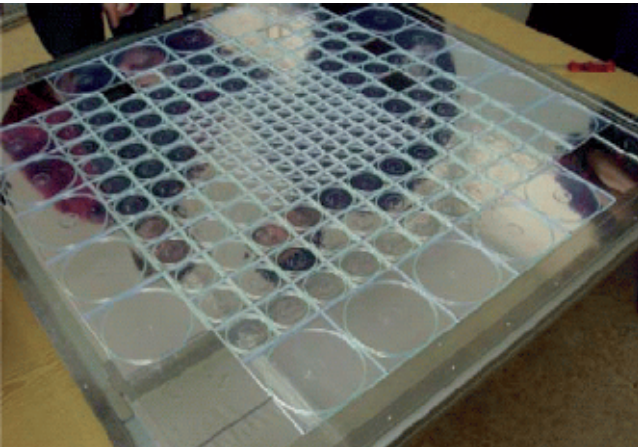


Abbildung 74: Anordnung der Scintillatorziegel auf einer Ausleseebene des HCAL Prototypen. Deutlich erkennbar ist die feinere Granularität im Zentrum.

DESY-II sowie Tests mit kosmischen Muonen durchgeführt. Dabei wurde auch das Datennahmesystem in Betrieb genommen, das in den Hadronstrahltests zum Einsatz kommen soll. Die Detektorsignale werden auf speziellen, in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe FEB entwickelten Elektronikarten verarbeitet, bevor sie an die zentrale Datennahme weitergeleitet werden. Eine Datenrate von durchschnittlich 100 Ereignissen pro Sekunde wurde erreicht. Die Parameter des Detektorbetriebs, wie beispielsweise die Betriebsspannungen der Halbleiterdetektoren und die in ihnen fließenden Ströme, werden im Slow-Control-System elektronisch überwacht und aufgezeichnet.

Als Detektoren werden Photonenvervielfacher auf Siliziumbasis (SiPM) eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine quadratische Matrix aus ca. 1000 Dioden, an die eine Betriebsspannung in Sperrrichtung angelegt wird, so dass in jeder Diode eine Verarmungszone entsteht. Die Spannung ist so gewählt, dass ein einzelnes, durch ein auftreffendes Photon ausgelöstes Elektron in der Verarmungszone eine Ladungswave mit ungefähr einer Million Elektronen hervorruft (so genannter Geiger-Modus). Eine einzelne Diode, die in Analogie zu bildgebenden Bauteilen auch *Pixel* genannt wird, kann auf diese Weise einzelne Photonen nachweisen. Ausgelesen wird die Summe der Signale der einzelnen Dioden, die

ein Maß für die Anzahl der auf den SiPM auftreffenden Photonen ist.

Zur Eichung des Prototypkalorimeters wird ein Lichtinjektionssystem verwendet. Das Licht von Leuchtdioden (LED), die seitlich an den Scintillatorlagen auf speziellen Elektronikarten angebracht sind, wird über optische Fasern zu den Ziegeln geleitet. Jeweils eine LED stellt das Licht für 18 Ziegel zur Verfügung. Zur Messung der Halbleiterdetektorverstärkung müssen Lichtpulse geringer Intensität ausgesandt werden, die in den Detektoren zur Auslösung einer nur geringen Zahl von Pixeln führen. Das Spektrum des Detektorsignals für eine Vielzahl solcher Pulse ist in Abbildung 75 gezeigt. Die Separation der Signale einzelner Pixel entspricht der Verstärkung. Das Lichtinjektionssystem wird außerdem zur Langzeitüberwachung der SiPMs eingesetzt.

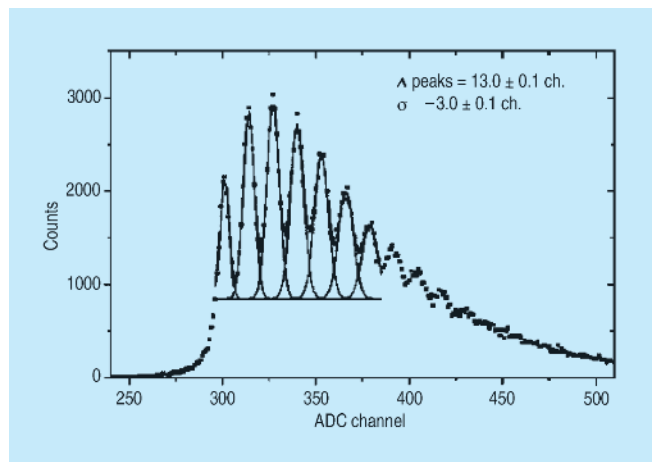


Abbildung 75: Pulshöhenspektrum eines SiPM Detektors für einzelne Photonen.

Die Entwicklung des hadronischen Kalorimeters finden innerhalb der internationalen CALICE-Kollaboration in Zusammenarbeit mit Instituten aus Deutschland (Universität Hamburg), Frankreich, Großbritannien, Russland, Tschechien und den USA statt. Die Ziegel und die Halbleiterdetektoren werden von den Moskauer Instituten ITEP und MEPhI in Zusammenarbeit mit der Firma PULSAR produziert. Die integrierten Verstärkerchips auf den Elektronikarten werden bei LAL in Orsay entwickelt und werden auch für den

Prototyp eines elektromagnetischen Kalorimeters der CALICE-Kollaboration eingesetzt. Die zentrale Datennahme wird federführend von den Londoner Instituten Imperial College und UCL aufgebaut. Die Elektronik des Lichtkalibrationssystems wird vom Prager Physikinstitut entwickelt.

Ein strahlnahes Kalorimeter für den ILC

Am ILC sind zwei Wechselwirkungszone geplant mit Kreuzungswinkeln von 2 und 20 mrad zwischen Elektronen- und Positronenstrahl. In beiden Varianten sind in der strahlnahen Region des geplanten ILC Detektors zwei Kalorimeter vorgesehen, welche hohen Anforderungen, speziell in der Strahlenhärte, genügen müssen. In Abbildung 76 ist ein Entwurf der Geometrie für den 20 mrad Fall dargestellt.

Das BeamCal, welches direkt an der Strahlröhre anliegt und einen Polarwinkel von etwa 5 bis 30 mrad überdeckt, muss unter sehr hoher Strahlenbelastung funktionstüchtig bleiben. Elektronen und Positronen der *Beamstrahlung* deponieren eine Dosis von etwa 10 MGy pro Jahr. Für die Physik am ILC ist es wichtig, hochenergetische einzelne Elektronen bis zu kleinsten Polarwinkeln trotz dieses sehr hohen Untergrundes zu

erkennen, da diese einen Untergrund bei der Suche nach neuen Teilchen verursachen.

Die Verteilung der *Beamstrahlung* im Bereich des BeamCal kann zur Strahldiagnose und Korrektur genutzt werden. Im Rahmen von EUROTeV wird an einem Verfahren zur schnellen Luminositätsmessung gearbeitet. Innerhalb eines Zuges von Elektron/Positron Paketen soll der Strahl so gesteuert werden, dass am Kollisionspunkt die maximale Luminosität erreicht wird.

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.

Die internationale FCAL Kollaboration hat sich die Ausarbeitung eines technischen Designs für beide Kalorimeter zum Ziel gesetzt. Im Moment wird an umfangreichen Monte Carlo Rechnungen zur Optimierung der Struktur gearbeitet. Parallel werden Sensor Prototypen getestet und Vorbereitungen für den Aufbau von Prototypen der Kalorimeter getroffen.

Um die genannten Ziele zu erreichen, müssen die Kalorimeter sehr kompakt sein, eine hohe Granularität besitzen und sehr schnell ausgelesen werden. Umfangreiche Monte Carlo Studien haben zu dem Schluss geführt, dass Diamant-Wolfram oder Silizium-Wolfram Sandwich Kalorimeter den Anforderungen genügen.

Sensoren aus Diamant versprechen, extrem strahlenhart zu sein, und gleichzeitig ähnliche Eigenschaften wie Siliziumzähler zu haben. Besonders für das BeamCal sind diese Sensoren eine sehr interessante Option. Allerdings erfordern sie noch wesentliche grundlegende Entwicklungsarbeiten.

Polykristalline CVD Diamant-Sensoren, welche das Fraunhofer Institut für angewandte Festkörperphysik in Freiburg und die Firma E6 angefertigt haben, wurden in einem Teststrahl in einem großen Intensitätsbereich untersucht. Linearität und Homogenität wurden getestet. Die Resultate, ein Beispiel ist in Abbildung 77 gezeigt, sind sehr zufrieden stellend.

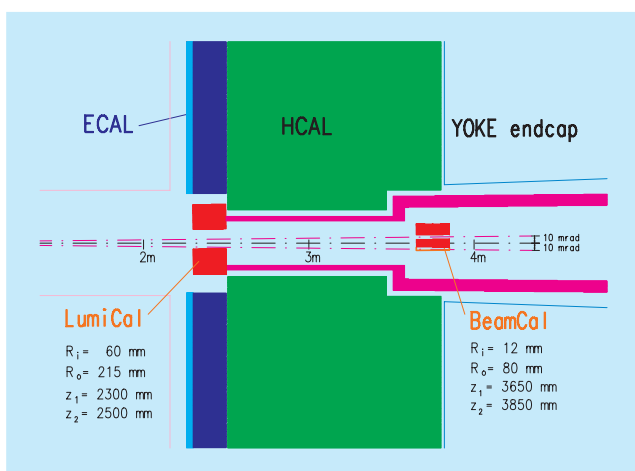


Abbildung 76: Entwurf der Vorwärtsregion für einen Strahlkreuzungswinkel von 20 mrad.

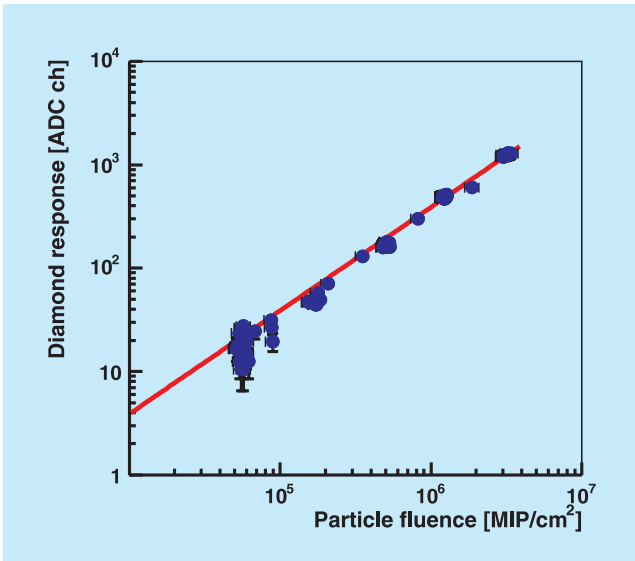


Abbildung 77: Das Signal eines Diamantsensors als Funktion des Teilchenflusses.

Die Herstellung einkristalliner Diamantsensoren stellt zurzeit noch eine hohe technologische Herausforderung dar. Untersuchungen an einem $5 \times 5 \times 0.3 \text{ mm}^3$ großen Sensorprototypen zeigen die hervorragenden Eigenschaften dieses Materials. Die klare Trennung des Signals eines hochenergetischen Elektrons vom Rauschen ist in Abbildung 78 sehr schön zu sehen. Die weitere Entwicklung der Technologie zu großflächigen Sensoren wird intensiv verfolgt.

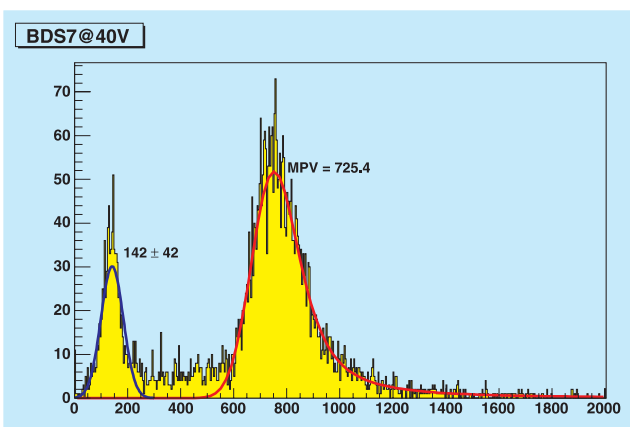


Abbildung 78: Das Signal eines einkristallinen Diamantsensors bei $0.13 \text{ V}/\mu\text{m}$.

Physikalische Studien zum ILC

Die physikalische Motivation für den ILC ist intensiv in den letzten Jahren untersucht und auch dokumentiert worden. Im Moment werden noch verschiedene supersymmetrische Szenarien untersucht, und auch die Rolle von Optionen am Beschleuniger (z. B. die $\gamma\gamma$ Option) näher studiert.

Eine mögliche Erweiterung des Standardmodells ist die Supersymmetrie. Falls es supersymmetrische Teilchen im Energiebereich des ILC gibt, ist die Produktionsrate im $\gamma\gamma$ -Modus höher als im e^+e^- Modus. Es ist daher sinnvoll zu untersuchen, in welchem Modus Zerfallparameter der supersymmetrischen Teilchen besser gemessen werden können. In Zeuthen wird die Produktion von Charginos und Smuonen im Detail untersucht. Ferner wird in Zusammenarbeit mit Physikern aus Dubna die Produktion von Top-Squarks studiert. Für die Charginos konnte gezeigt werden, dass die am $\gamma\gamma$ -Collider möglichen Messungen von Verzweigungsverhältnissen signifikant zum Verständnis der Supersymmetrie-Brechung beitragen können.

In Fortführung der gemeinsamen Studien zur Physik eines Linearcolliders wurde mit der Staatlichen Universität Moskau der Nachweis von Higgs-Bosonen im Minimalen Supersymmetrischen Standardmodell im intensiven Kopplungsregime durch Publikation abgeschlossen. Es konnte gezeigt werden, dass in diesem Regime der ILC dem LHC deutlich überlegen ist, wenn zunächst die Erzeugung von h/H Bosonen im Higgs-Strahlungsprozess $e^+e^- \rightarrow Z + h/H$ (mit Zerfällen des Z Bosons in Elektron- und Muonpaare) untersucht wird. Anschließend ist es möglich, wichtige Parameter des pseudoskalaren Higgs-Bosons A^0 im Paarerzeugungsprozess $e^+e^- \rightarrow A + h/H$ bei Kenntnis der Massen von h und H zu ermitteln.

Ferner wurde eine Studie zur Suche eines Teilchens begonnen, das dem Photon im Standardmodell sehr ähnlich ist. Dieses in bestimmten Erweiterungen des Standardmodells vorhergesagte Teilchen sollte bevorzugt vom Top-Quark abgestrahlt und durch seine vernachlässigbar kleine Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie nachgewiesen werden. Die technischen Vor-

aussetzungen zur Simulationssuche dieses Teilchens wurden geschaffen, so dass diese Analyse im ersten Halbjahr 2006 abgeschlossen werden kann.

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

Softwareentwicklungen

Die Entwicklung eines komplexen Detektors wie des LDC bedarf umfangreicher und komplexer Software-Systeme. Gerade beim ILC Detektor, der wesentlich auf Präzision hin entwickelt wird, kann eine sinnvolle Detektoroptimierung nur dann erfolgen, wenn schon im Entwicklungsstadium fast vollständige Rekonstruktionsalgorithmen vorliegen.

Bereits in den letzten Jahren ist an dieser Stelle über die Entwicklung von LCIO, dem Linear Collider Daten Format, berichtet worden. Diese Software, welche in enger Zusammenarbeit mit SLAC entwickelt worden ist, bildet die Basis für alle weiteren Software Projekte, und wird aktiv weiter entwickelt.

Für die Simulation von Ereignissen am ILC wird das Paket MOKKA, basierend auf GEANT4, verwendet. MOKKA ist von einer Gruppe an der Ecole Polytechnique in Frankreich entwickelt worden. Die Verarbeitung der simulierten Ereignisse passiert unter der Kontrolle des MARLIN Programm Paketes. MARLIN wurde von der Gruppe *Computing in Experimental Physics* am DESY erstellt, und liefert ein Rahmenprogramm, welches es einfach macht, in Form so genannter Prozessoren Funktionalität zum Rekonstruktions- und Analyseprogramm hinzuzufügen. Es basiert auf dem LCIO

Datenmodell. Eine erste offizielle Version wurde 2005 erstellt.

Eine Reihe von Prozessoren unter MARLIN wurden im Laufe des Jahres fertig gestellt, und erlaubten es, eine erste fast komplette Rekonstruktionskette zur Verfügung zu stellen.

Basierend auf dem bereits vor einigen Jahren entwickelten FORTRAN basierten Spurerkennungs- und Rekonstruktionscode wurde ein TPC Spurerkennungs-Prozessor entwickelt.

Eine zentrale Rolle bei der Rekonstruktion von Ereignissen am ILC spielt das Konzept des Teilchenflusses (*Particle Flow concept*). Eine erste komplette Version eines Teilchenfluss Prozessors konnte für das Snowmass Treffen fertig gestellt werden. Für relativ einfache Ereignisse am ILC konnte das Ziel einer Jet-Energie Auflösung von $30\%/\sqrt{E}$ fast erreicht werden (siehe Abbildung 79).

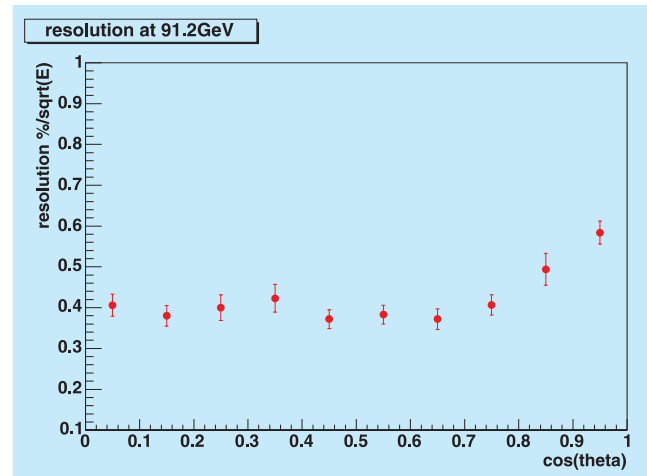


Abbildung 79: Simulierte Jet-Energie Auflösung im LDC Detektor als Funktion des Polarwinkels nach Rekonstruktion mit MARLIN.

Erhebliche Arbeit floss auch in die Entwicklung verschiedener generell einsetzbarer Werkzeuge. Besonders erwähnt werden soll das RAIDAK Paket, welches eine Brücke zwischen dem generischen Histogrammierpaket AIDA und dem graphischen Analysepaket ROOT herstellt. Die gesamte Software, die für den ILC ent-

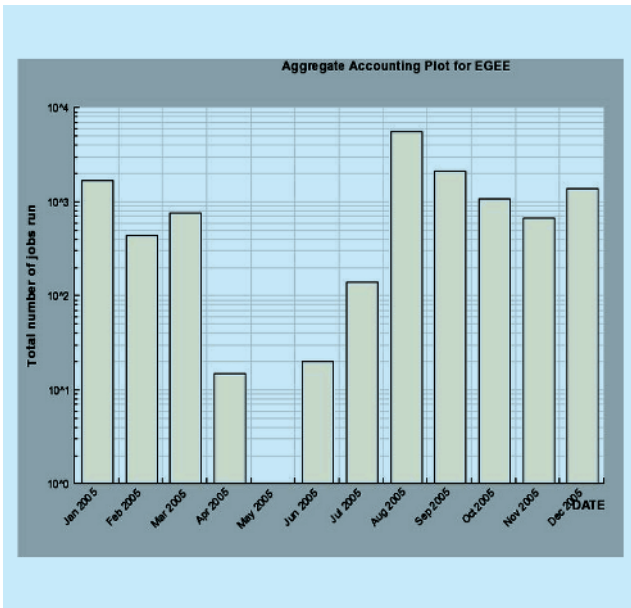


Abbildung 80: Zahl der unter ILC auf dem GRID gerechneten Jobs im Jahre 2005.

wickelt worden ist, wurde im letzten Jahr soweit modifiziert, dass sie auf dem GRID laufen kann. Inzwischen unterstützen eine große Zahl von Instituten ILC Computing auf dem GRID, was es erlaubt, Simulations-Rechnungen im erforderlichen Umfang durchzuführen. In Abbildung 80 ist die Zahl der GRID Jobs, die unter ILC im Jahre 2005 gerechnet worden sind, gezeigt.

Ausbildung

Die für den International Linear Collider durchgeführten Arbeiten beruhen entscheidend auf Beiträgen von Diplomanden und Doktoranden, und werden vielfach von jungen Postdoctoral Fellows koordiniert. Die Attraktivität des Projektes gerade auch für Nachwuchsphysiker zeigt sich auch darin, dass es gelang, im Jahre 2005 zwei Nachwuchsgruppen für den ILC am DESY anzusiedeln. Die Zahl der Anfragen nach Doktorandenstellen übersteigt das Angebot.

Auch im Jahre 2005 haben wieder mehrere Schüler und Schülerinnen die Möglichkeit zu einem Praktikum im Rahmen der ILC Aktivitäten wahrgenommen. Die

Schüler nehmen für einige Wochen an den Forschungsaktivitäten der Gruppe teil und sind in das wissenschaftliche Leben eingebunden. Die Resonanz von Seiten der Schüler und auch der Schulen war durchgängig sehr positiv.

Wie schon in den vergangenen Jahren fand auch 2005 wieder ein von der Universität organisiertes mehrtägiges Schülerprogramm statt. Etwa 6 Schüler und Schülerinnen wurden von FLC in diesem Rahmen betreut.

Im Sommer arbeiteten mehrere Sommerstudenten an verschiedenen Projekten sowohl am Standort Hamburg als auch am Standort Zeuthen. Ein Student nahm in Rahmen eines ausgedehnten Praktikums an der Messperiode von E166 am SLAC teil.

Zusammenfassung und Ausblick

Die ILC-Projektgruppe am DESY hat im Jahre 2005 ihre Arbeit aufgenommen, und ist inzwischen am Labor etabliert. Beide Standorte sind an diesem Projekt beteiligt. Die Arbeiten finden in enger Abstimmung, unterstützt durch regelmässige Treffen der Arbeitsgruppen in Hamburg oder in Zeuthen, statt.

In Hamburg profitieren die Arbeiten am ILC von der großen Nähe zum XFEL, wodurch viele Synergie-Effekte entstehen und auch genutzt werden. Darüber hinaus ist Hamburg, besonders auch im Rahmen von EUROTeV, an verschiedenen Systemen des ILC beteiligt. In Zeuthen liegt der Schwerpunkt der Beteiligungen am E166 Experiment, und bei der Entwicklung eines Strahlenergiespektrometers.

Die Detektorentwicklung in Zeuthen konzentriert sich auf die Entwicklung der strahlenharten Kalorimetrie, während in Hamburg die Projekte TPC und HCAL verfolgt werden. Physikstudien und Softwareentwicklungen werden in sehr enger Kooperation beider Standorte durchgeführt.

Eines der wichtigsten Ziele für den ILC im Jahre 2006 wird die Erstellung des *Reference Design Reports* sein, der am Ende des Jahres erwartet wird. In ihm wird ein detailliertes Design der Maschine vorgestellt werden,

zusammen mit einem Kostenrahmen. Im Bereich der ILC-Physik und des Detektors wird dieses Dokument durch den *Detector Conceptual Report* (DCR) ergänzt werden. DESY Physiker werden an der Erstellung die-

ser Dokumente intensiv mitarbeiten. Mit der Fertigstellung dieser Dokumente wird der ILC als internationales Projekt definiert sein, und kann dann in die nächste Stufe der detaillierte technischen Vorbereitung eintreten.

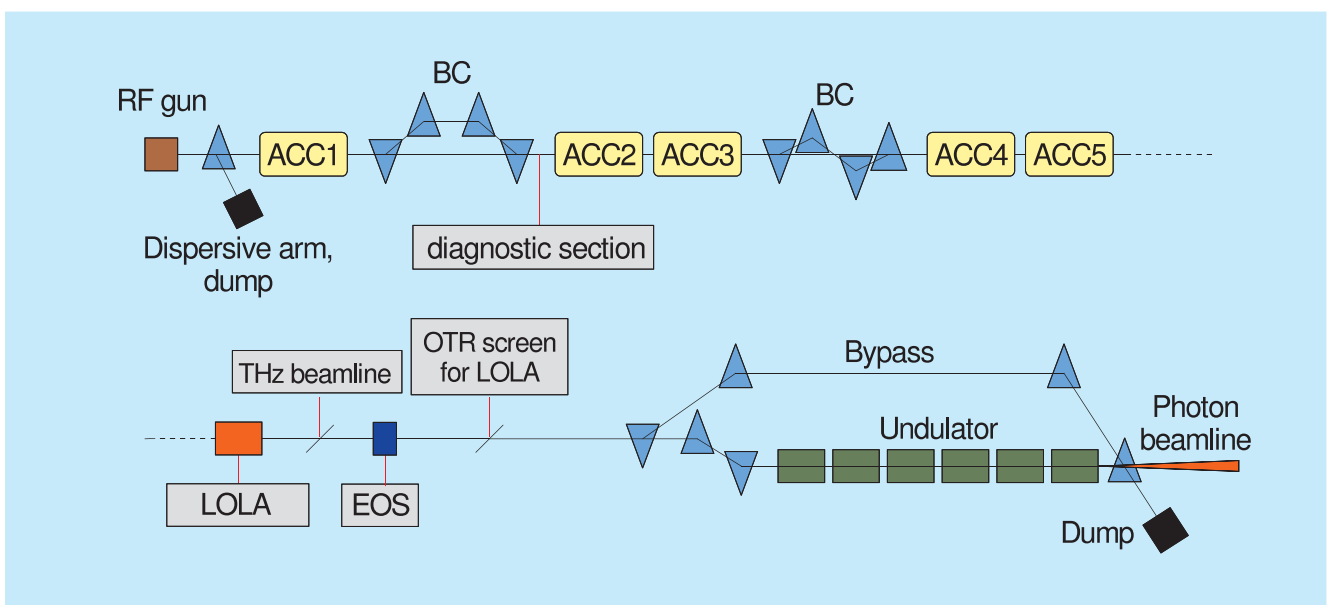


Abbildung 81: Schematische Darstellung des 250 m langen VUV-FEL. Die in einer HF-Elektronenquelle erzeugten Elektronen werden in den Beschleunigungsmodulen ACC1 – ACC5 auf 380–500 MeV beschleunigt. In zwei magnetischen Bunch-Kompressoren BC werden die Elektronenpakete longitudinal komprimiert. Gezeigt werden die Strahldiagnose-Einrichtungen EOS, die THz beamline, die transversal ablenkende HF-Wanderwellenstruktur LOLA sowie die Diagnostik-Sektionen zur Bestimmung der Emittanz und der Betafunktion.

Forschung Linearbeschleuniger-Technologien

Gruppenleiter: B. Schmidt

Die Gruppe FLA arbeitet an hochauflösenden Strahl-
diagnosesystemen für den VUV-FEL und den XFEL. **Abbildung 81 zeigt eine schematische Darstellung des VUV-FEL und der verschiedenen Mess-Einrichtungen. Zur Bestimmung der longitudinalen Ladungsverteilung in den komprimierten Elektronenpaketen werden drei Methoden angewandt: die elektro-optische Abtastung (*electro-optic sampling EOS*), die THz-Spektroskopie kohärenter Übergangsstrahlung und die transversale Strahlablenkung mittels einer Hochfrequenz-Wanderwellenstruktur (LOLA). Die transversalen Strahlparameter werden in zwei Diagnostik-Sektionen vermessen. Ein wichtiges Zukunftsprojekt 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.**

Elektro-optische Vermessung der Elektronen-Pakete in Linearbeschleunigern

Am Linac des VUV-FEL ist vor dem Eintritt des Elektronen-Strahls in den Undulatorbereich ein Experiment aufgebaut worden, bei dem das mitgeführte Ladungsfeld der Elektronenpakete mit Hilfe des elektro-optischen Effekts direkt vermessen werden kann. Auf diese Weise entfallen die Beugungsverluste, die bei Messungen mit kohärenter Übergangsstrahlung das Frequenzspektrum nach unten beschneiden und damit Verzerrungen des Ladungsprofils vortäuschen. Der

Titan-Saphir-Laserstrahl tritt durch ein dünnes Fenster unter einem Winkel von 6° gegen den Elektronenstrahl ein. Mittels eines fahrbaren Schirms können der Laserstrahl und die optische Übergangsstrahlung (*optical transition radiation OTR*) auf eine schnelle Photodiode geleitet werden, mit deren Hilfe die zeitliche Synchronisation der Laserpulse mit den Elektronen-Bunchen mit ca. 100 ps Genauigkeit vorab eingestellt werden kann. Die eigentliche elektro-optische Messung, vor deren Beginn der OTR-Schirm herausgefahren wird, erfordert das Abtasten eines Zeitintervalls von einigen 100 ps in kleinen Schritten, um die Koinzidenz von Laserpuls und Elektronenbunch auf einer Pikosekunden-Zeitskala zu etablieren. Der schematische Aufbau des Experiments ist in Abbildung 82 dargestellt. Die Synchronisation der TiSa-Laserpulse (Wiederholrfrequenz 81 MHz) mit der Linac-HF (1300 MHz) erfolgt mit einer in Zusammenarbeit mit der Protvino-Gruppe gebauten Elektronik, in der die 16. Harmonische der Laserfrequenz mit der Linac-HF gemischt wird. Die gemessenen Zeitschwankungen liegen unter 40 fs.

Im Frühjahr 2005 sind die Messungen zur elektro-optischen Abtastung gemacht worden. Bei dieser Methode (*electro-optic sampling EOS*) wird das Zeitprofil der Bunche durch sehr kurze TiSa-Pulse in kleinen Schritten abgetastet. Die Bunchform ergibt sich aus Messungen an sehr vielen Elektronenpaketen. Die Ergebnisse sind ähnlich wie in unseren im Vorjahr durchgeführten EOS-Messungen am Linac der Swiss Light Source, siehe den Jahresbericht 2004.

Interessanter für die Strahl diagnose sind Einzelbunchmessungen. Dafür wird der 15 fs-Laserpuls in einem dispersiven Material auf eine Länge von mehreren ps

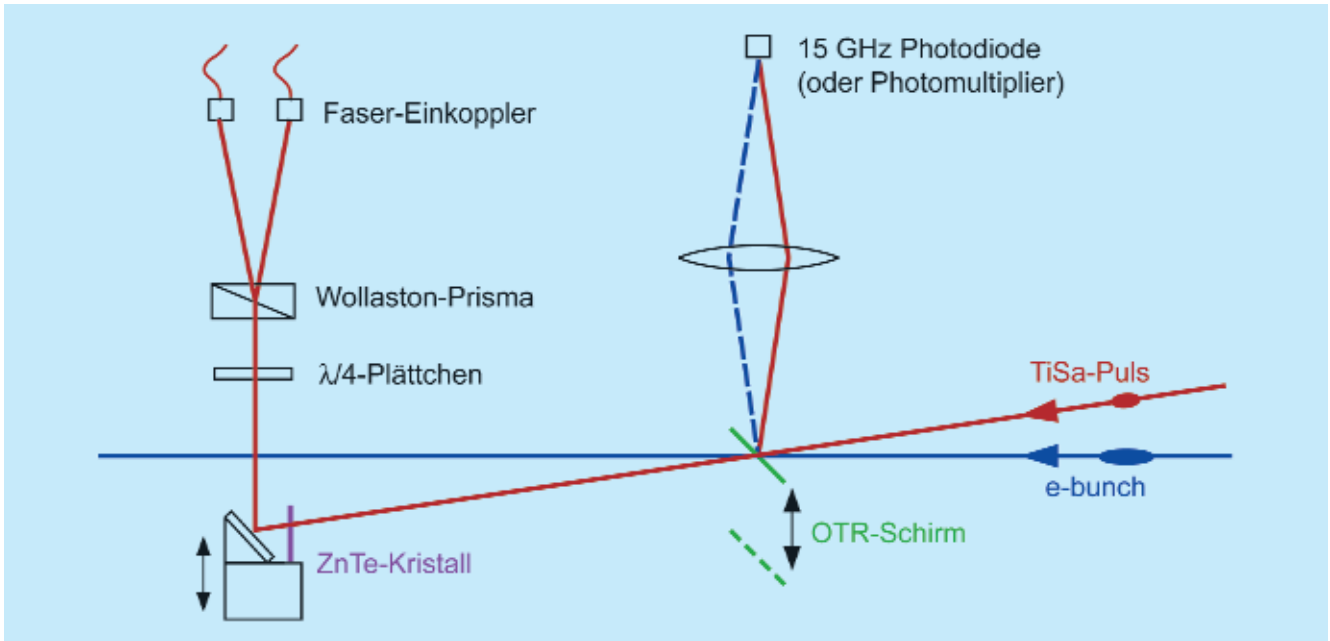


Abbildung 82: Elektro-optischer Aufbau am Linac des VUV-FEL.

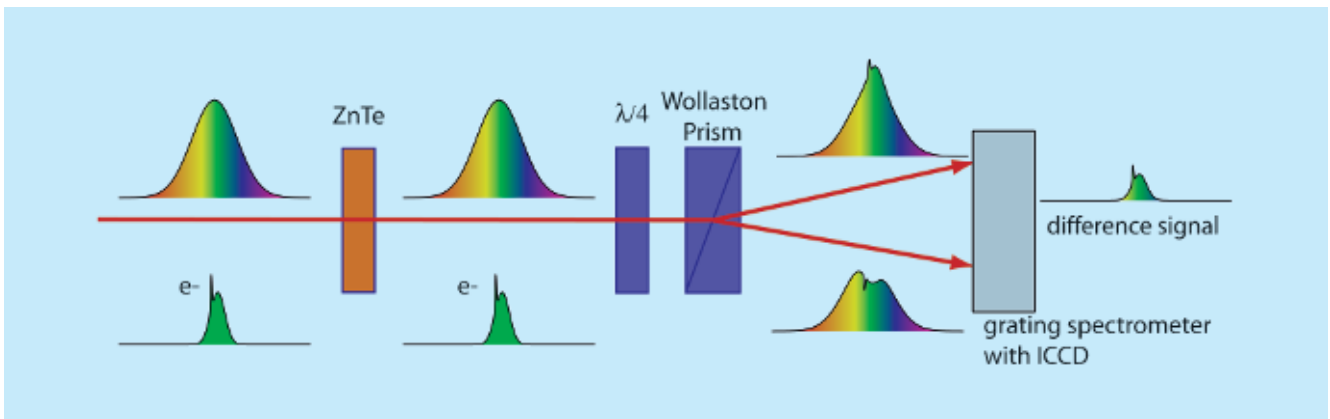


Abbildung 83: Schematische Darstellung der elektro-optischen Rekonstruktion der Ladungsverteilung in den Elektronenpaketen mit Hilfe der spektralen Codierung. Oben wird der auf mehrere Pikosekunden gestreckte Laserpuls gezeigt, bei dem die langwelligen Anteile zeitlich früher im Puls angeordnet sind, die kurzwelligen später (bei dem Bild liegen wie auf einem Oszillographenschirm frühe Zeiten links, späte rechts). Unten ist die typische zeitliche Ladungsverteilung eines Elektronenpakets im Linac des VUV-FEL dargestellt. Im Zink-Tellurid-Kristall wird die elektrische Feldverteilung des Bunches den beiden Polarisationskomponenten des Laserpulses aufgeprägt. Durch spektrale Zerlegung, Aufnahme der Spektren mit einer CCD-Kamera und Subtraktion der beiden Spektren gewinnt man das Zeitprofil des Bunches.

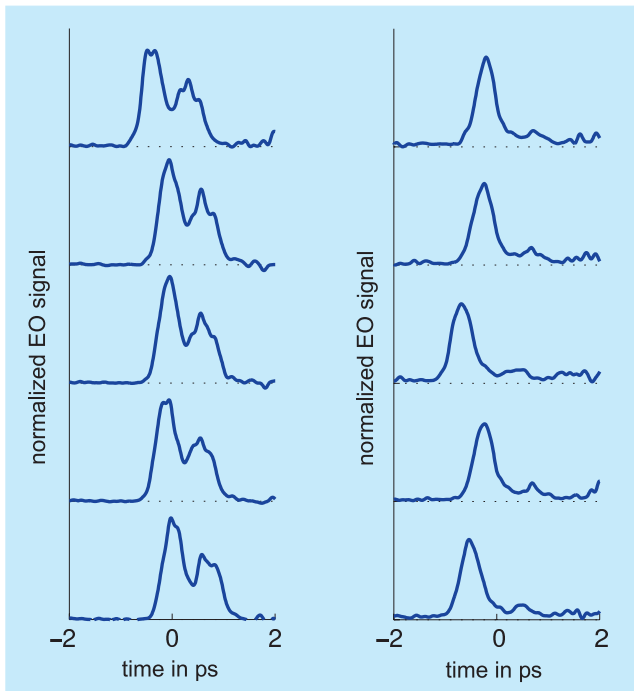


Abbildung 84: Pulsformen einzelner Elektronenpakete, gemessen mit der spektralen Codierungsmethode. Links: Pulsform der Elektronen-Pakete bei falsch eingestellten Parametern des Bunch-Kompressionssystems. Rechts: Form der Pakete bei optimaler longitudinaler Kompression.

gestreckt, wobei die langwelligen Spektralanteile sich am zeitlichen Anfang des gestreckten Laserpulses befinden und die kurzwelligen am Ende. Diesem Puls, der länger als der Elektronenbunch ist, wird im ZnTe-Kristall die Zeitstruktur des elektrischen Bunchfeldes aufgeprägt, siehe Abbildung 83. Durch eine Spektralanalyse des auslaufenden Laserpulses kann dann die longitudinale Ladungsverteilung im Elektronenbunch rekonstruiert werden. Diese Methode der spektralen Codierung ist im Sommer 2005 mit Erfolg in Betrieb genommen worden. Einzelbunchmessungen werden in Abbildung 84 gezeigt.

Man erkennt aus diesen Daten, dass falsch eingestellte Beschleunigerparameter sofort erkennbar sind und dass die Ankunftszeit der Bunche am ZnTe-Kristall um typisch ± 150 fs schwankt. Das EO-System kann die Ankunftszeit mit einer deutlich besseren Genauigkeit

(50 fs rms) ermitteln, die beobachteten Zeitschwankungen sind daher größtenteils Beschleuniger-bedingt und im Wesentlichen auf kleine Energievariationen zurückzuführen, die sich im magnetischen Umweg des Bunchkompressors in Zeitschwankungen transformieren. Mit Hilfe des in der Entwicklung befindlichen Femtosekunden-Synchronisationssystems werden sich die Zeit- und Energieschwankungen deutlich reduzieren lassen.

Aufbau einer THz-Strahlführung für kohärente Übergangsstrahlung

Kohärente Übergangs- und Diffraktionsstrahlung im THz-Bereich bietet hervorragende Möglichkeiten, die Zeitstruktur der Elektronenbunche auf der Skala von 10–100 Femtosekunden zu studieren. Um die im Beschleunigervakuum erzeugte Übergangsstrahlung optimal für Diagnosezwecke nutzen zu können, ist es zweckmäßig, sie aus dem Beschleunigerbereich herauszuführen. Zu diesem Zweck wurde eine optische Strahlführung mit fünf fokussierenden Metallspiegeln entwickelt, die es erlaubt, THz-Strahlung von 0.2 THz bis 40 THz mit hoher Effizienz vom Beschleunigerbereich in eine externe Messhütte zu leiten. Die Strahlführung erfolgt in einem Vakuumrohr, um die starke Absorption von THz-Strahlung in feuchter Luft zu unterbinden. Für den Strahl-Austritt aus dem Ultrahochvakuum des Linacs wurde ein 0.5 mm dickes Diamantfenster mit 20 mm Durchmesser gewählt, da Diamant das einzige Material ist, das eine hohe und frequenzunabhängige Transmission im Bereich von 0.1–40 THz hat. Das Fenster wurde vom Fraunhofer-Institut Freiburg mittels der CVD-Technik (*chemical vapour deposition*) hergestellt. Die THz-Strahlführung ist so ausgelegt, dass sowohl Messungen der spektralen Intensitätsverteilung als auch zeitaufgelöste Messungen mit EO-Techniken oder Streak-Kameras möglich sind.

Die Propagation der THz Strahlung durch das optische System wird auf Grund der langen Wellenlängen (7 μm bis 1.5 mm) wesentlich durch Beugungseffekte an den Strahlbegrenzungen und den optischen Elementen bestimmt. Das in unserer Gruppe entwickelte

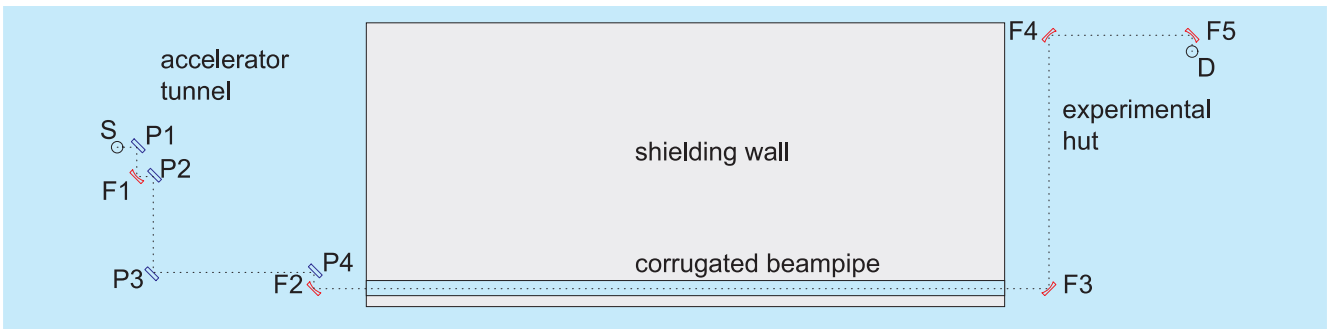


Abbildung 85: Darstellung der Auskopplung der THz-Strahlung und des optischen Transportweges vom Beschleunigerbereich bis in die Messhütte. Die kohärente Übergangsstrahlung wird am Schirm *S* erzeugt und durch ein Diamantfenster in 40 mm Abstand (nicht gezeigt) auf den ersten Spiegel geleitet. Die fokussierenden Spiegel sind mit *F1* bis *F5* bezeichnet, die Planspiegel mit *P1* bis *P4*. Die Spiegel sind aus Stahl bzw. Aluminium hergestellt worden. Die Bearbeitung erfolgte mit Diamantwerkzeugen, die Oberflächenrauigkeit liegt unter 10 nm. Die Spiegel sind mit Gold beschichtet, um ein hohes Reflektionsvermögen im THz-Bereich zu erzielen. Am Brennpunkt des letzten Spiegels befindet sich ein pyroelektrischer Detektor *D*.

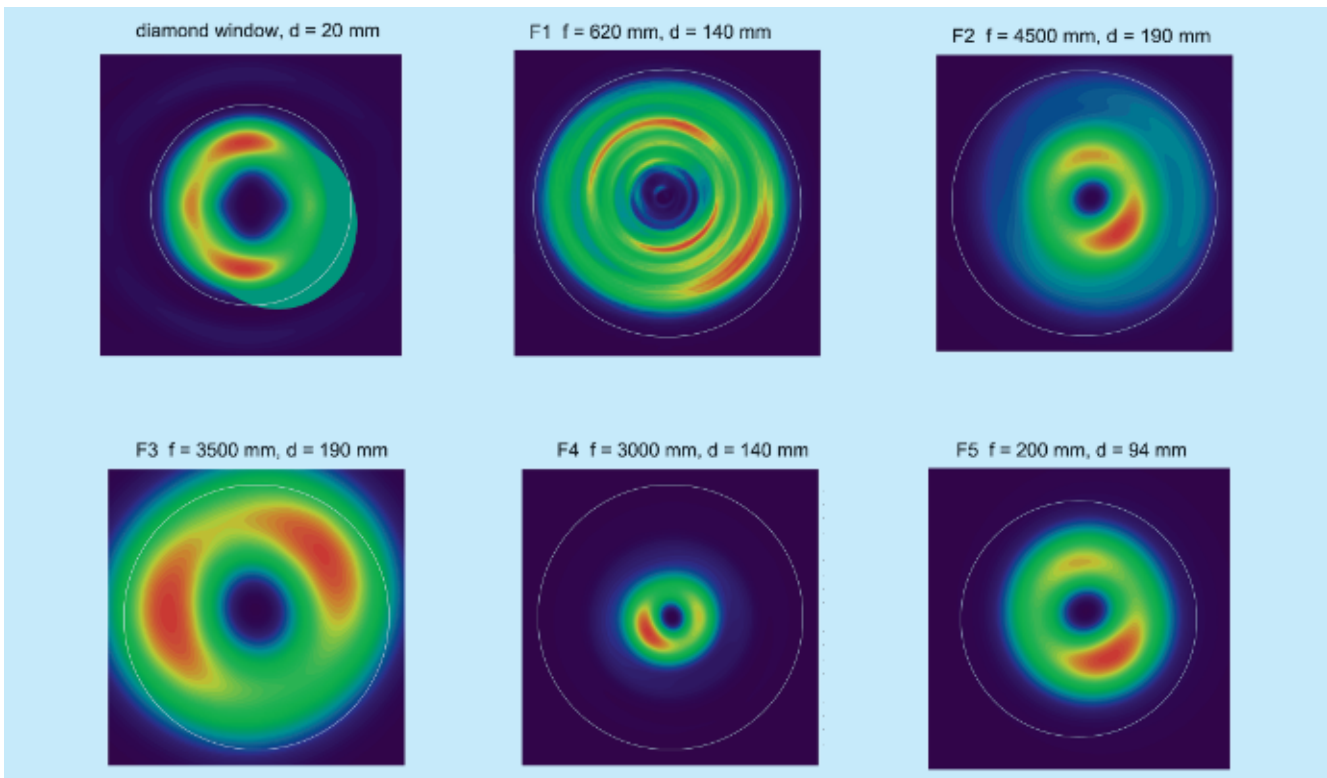


Abbildung 86: Intensitätsverteilung der kohärenten Übergangsstrahlung auf den optischen Elementen der THz-Strahlführung (Diamantfenster und fünf fokussierende Toroid-Spiegel). Die Aperturen des Fensters und der Spiegel sind durch die eingezeichneten Kreise angedeutet. Die Frequenz beträgt $f = 0.2 \text{ THz}$.

Mathematica-Programmpaket *THz-Transport* umfasst die Behandlung von Nah- und Fernfeldbeugung und erlaubt die Beschreibung von sphärischen, elliptischen, parabolischen und toroidalen Spiegelementen. Basierend auf Berechnungen mittels dieses Programms wurden die Metallspiegel der Strahlführung und das Diamantfenster zur Auskopplung der THz-Strahlung aus dem Beschleunigervakuum optimiert. Diese Komponenten sind industriell gefertigt und in die THz-Strahlführung eingebaut worden. Die Anordnung der optischen Elemente ist in Abbildung 85 dargestellt. Abbildung 86 zeigt exemplarisch die berechnete Intensitätsverteilung auf den optischen Elementen für eine Frequenz von 200 GHz.

Messung der transversalen Strahlparameter

Die Verstärkung in einem Ultraviolett- oder Röntgen-FEL hängt sehr kritisch von den Elektronenstrahl-Parametern ab. Die Verstärkungslänge L_g (*gain length*) ist gegeben durch

$$L_g \propto \left(\frac{\epsilon}{I_{\text{peak}}} \right)^{1/3}$$

wobei ϵ die transversale Emittanz ist und I_{peak} der Spitzenstrom innerhalb des Elektronenpakets. Um hohe Effizienz im SASE-Prozess (*self amplified spontaneous emission*) zu erzielen und die notwendige Länge des Undulatormagneten zu minimieren, muss ein sehr fein kollimierter Strahl mit hoher lokaler Ladungsdichte erzeugt werden. Die auf den Teilchenimpuls normierte Emittanz hat bei einer FEL-Wellenlänge von 6 nm der Bedingung $\epsilon_n \leq 2 \text{ mm mrad}$ zu genügen, der Spitzenstrom muss einige 1000 A betragen.

Bestimmung der mittleren Emittanz vieler Bunche

In zwei Diagnostik-Sektionen (siehe Abbildung 81) werden Emittanzmessungen unter Verwendung einer Mehrschirm-Methode durchgeführt. An vier Positionen wird die transversale Strahlverteilung vermessen,

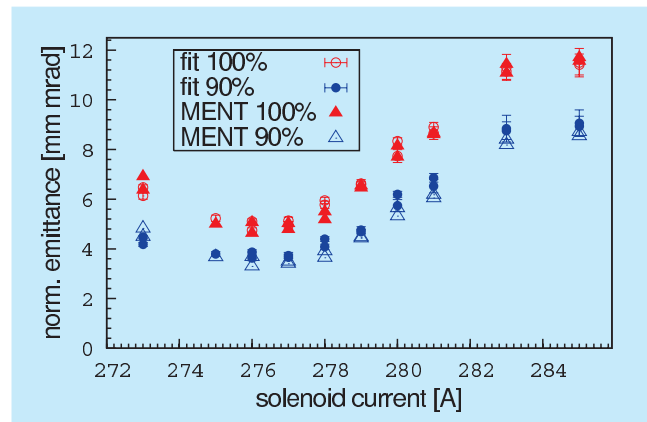


Abbildung 87: Die vertikale Emittanz als Funktion des Stroms im Hauptsolenoidmagneten der HF-Elektronenquelle. Die Emittanz wird mit zwei Methoden berechnet: durch eine Anpassungsrechnung (fit) und durch die Phasenraumtomographie mittels der Maximum-Entropie-Methode (MENT). Ergebnisse sind für 100% und 90% der Strahlintensität angegeben.

indem optische Übergangsstrahlung mit einer CCD-Kamera abgebildet wird. Alternativ wird die Strahldichteverteilung durch Abtasten mit einem dünnen Draht ermittelt (mit einem sog. *wire scanner*). Beide Methoden ergeben das über viele Bunche gemittelte transversale Ladungsdichteprofil. Die Kenntnis der Strahltransfermatrizen zwischen den Messpositionen erlaubt es, die Betafunktion, ihre Ableitung, sowie die Emittanz aus den gemessenen transversalen Strahlprofilen zu berechnen. Eine tomographische Rekonstruktion der Phasenraumverteilung wird mit Hilfe eines Maximum-Entropie-Algorithmus durchgeführt.

Abbildung 87 zeigt die Abhängigkeit der vertikalen Emittanz vom Strom im Hauptsolenoidmagneten der HF-Elektronenquelle. Mit optimierten Parametern konnte in der BC1-Diagnostiksektion eine normierte Emittanz von weniger als 2 mm mrad gemessen werden, was als ausgezeichneter Wert anzusehen ist.

Einzelbunch-Messungen

Ein äußerst leistungsfähiges Gerät zur Diagnose einzelner Elektronenpakete ist die in Zusammenarbeit

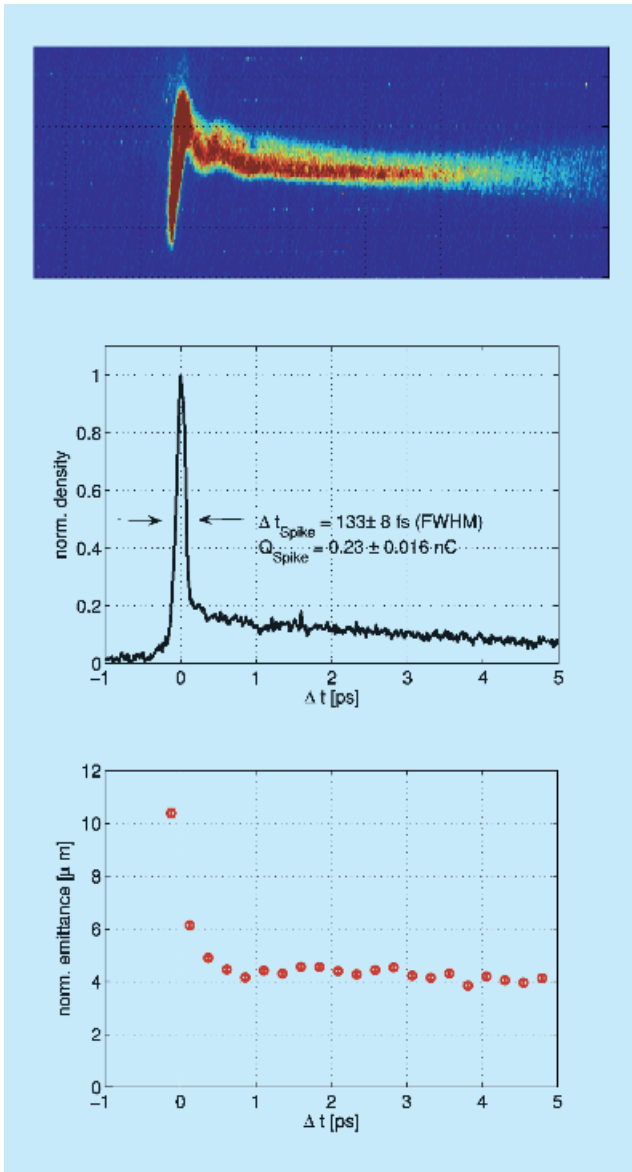


Abbildung 88: Oben: CCD-Aufnahme eines einzelnen Bunches mit Streckung durch LOLA. Der Kopf des Bunches befindet sich auf der linken Seite.

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

Unten: Die normierte horizontale Scheiben-Emittanz als Funktion der zeitlichen Position im Bunch.

von DESY und SLAC installierte und betriebene HF-Wanderwellen-Struktur LOLA. Die Struktur wird zu einer TE-Eigenschwingung hoher Feldstärke angeregt und überträgt auf die Elektronen eine vertikale Ab-

lenkung, die linear von der zeitlichen Lage der Teilchen innerhalb des Bunches abhängt. Auf diese Weise kann das Zeitprofil eines einzelnen Bunches mit hoher Auflösung gemessen werden. Die vertikal gestreckten Bunches werden auf einen Übergangsstrahlungs-Schirm gelenkt und mit einer CCD-Kamera fotografiert. Die Aufnahme eines gestreckten Bunches ist in Abbildung 88 zu sehen. Die Abbildung zeigt auch die daraus berechnete longitudinale Ladungsdichteverteilung im Bunch. Man beobachtet ein scharfes Maximum am Kopf des Bunches mit einer Halbwertsbreite von 133 fs sowie einen langen Ausläufer zu späteren Zeiten. Das scharfe Maximum enthält etwa 20% der Bunchladung. Nur in diesem Bereich ist die lokale Stromdichte hoch genug, um den SASE-FEL-Prozess auszulösen.

Die CCD-Bilder erlauben zudem die Bestimmung der horizontalen Strahlausdehnung in Abhängigkeit von der zeitlichen Position im Bunch. Aus Messungen dieser Breiten für verschiedene Quadrupolstärken kann die horizontale Emittanz einzelner Zeitscheiben des Bunches rekonstruiert werden. Diese Scheibenemittanz (*slice emittance*) ist ebenfalls in Abbildung 88 dargestellt. Sie liegt bei $\epsilon_n = 10 \text{ mm mrad}$ ganz am Anfang des Bunches, reduziert sich dann auf 6 mm mrad im Maximum der Ladungsverteilung und sinkt schließlich auf 4 mm mrad im Schwanz der Verteilung ab.

Femtosekunden-Synchronisation der Beschleuniger-Hochfrequenz

Der International Linear Collider ILC und der Europäische Röntgenlaser XFEL basieren auf supraleitenden Linearbeschleunigern (Linacs) von vielen Kilometern Länge. Die Hochfrequenz-(HF)-Leistung muss den supraleitenden Resonatoren mit hoher Phasen- und Amplitudenkonstanz zugeführt werden, um die engen Toleranzen hinsichtlich der Energie- und Zeitgenauigkeit der Strahlen einhalten zu können. In bisherigen supraleitenden Maschinen wie dem VUV-FEL bei DESY dient ein hochstabiler Mikrowellenoszillator als Referenz (*master oscillator*). Die HF-Signale werden über koaxiale Festmantelkabel entlang des Tunnels

geleitet und auf die verschiedenen Klystrons und supraleitenden Resonatoren verteilt. Auch der UV-Laser der Hochfrequenz-Fotokathode wird phasenstarr an den Referenzoszillator angekoppelt.

Bereits beim VUV-FEL zeigt sich, dass das jetzige Synchronisationssystem die extremen Anforderungen an die Zeitgenauigkeit der FEL-Pulse nur unzureichend erfüllen kann. Für den Röntgenlaser wird ein deutlich verbessertes System gebraucht. Um die kurzen XFEL-Pulse (typische Dauer einige 10 Femtosekunden) sinnvoll nutzen zu können, z. B. in *pump-and-probe*-Experimenten, müssen die Elektronenpakete (*Bunche*) mit einer Präzision von typisch 10 fs relativ zur Hochfrequenz der Maschine synchronisiert werden. Die besten Mikrowellenoszillatoren können diese Stabilität gerade noch gewährleisten, allerdings führt die Verteilung der HF-Signale über Koaxialkabel von mehreren Kilometern Länge zu merklichen Qualitätseinbußen durch Zeitschwankungen (*time jitter*) aufgrund von Mikrophonie, elektromagnetischen Störsignalen und Längenänderungen durch Temperaturvariationen. Im ILC sind zwar die Bunche nicht ganz so kurz wie im XFEL, aber wegen der mehr als zehnmals größeren Länge des Colliders ergeben sich analoge Synchronisationsprobleme.

Ein vielversprechendes neues Konzept ist die Frequenzverteilung mit Hilfe von periodischen optischen Pulsen. Die wesentlichen Komponenten eines optischen Referenzoszillator-Systems sind: ein ringförmig aufgebauter gepulster Faserlaser mit hochstabiler Repeatsionsrate, längenstabilisierte Glasfaserleitungen, die die optischen Pulse in der Maschine verteilen, sowie opto-elektronische Geräte zur Konversion der optischen Signale in elektronische HF-Signale am Ende der Glasfasern. Der Hauptvorteil dieses Konzepts liegt darin, dass Glasfasern durch ein Rückkopplungssystem längenstabilisiert werden können. Dazu wird am Ende der Glasfaserleitung ein Teil der Laserintensität reflektiert, durch die Glasfaser zurückgeleitet und zeitlich mit der periodischen Laserpulschette verglichen. Über einen piezo-elektrisch regelbaren Faserstrecke (*fiber stretcher*) wird die Lichtlaufzeit in der Glasfaserleitung auf einen vorgegebenen Wert stabilisiert. Dieses Konzept hat das Potenzial, HF-Signale über viele Kilometer

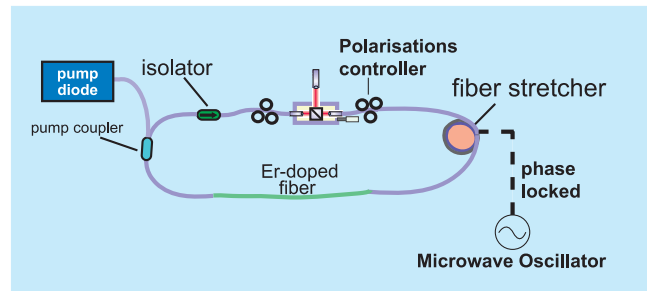


Abbildung 89: Schematischer Aufbau eines Erbium-dotierten Faserlasers mit Phasen-Kopplung an einen Mikrowellenoszillator.

mit Zeitschwankungen von unter 10 Femtosekunden zu verteilen.

In Kooperation mit der Laserphysik-Gruppe von Prof. F. Kärtner am Massachusetts Institute of Technology (MIT) arbeitet ein Doktorand (Axel Winter) an der Entwicklung eines ultrastabilen optischen Referenzoszillators. Passiv modengekoppelte Faserlaser (Abbildung 89) sind vielversprechende Kandidaten, die erforderliche Stabilität und Zuverlässigkeit des Systems

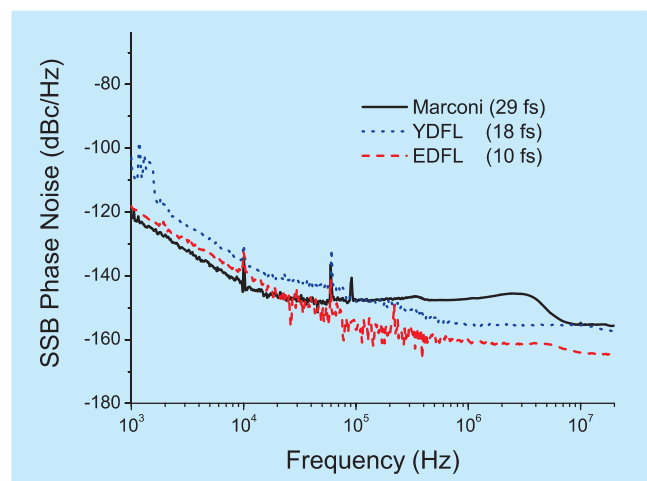


Abbildung 90: Durchgezogene Kurve: Rauschspektrum eines hochstabilen elektronischen Frequenzgenerators der Fa. Marconi. Gestrichelte Kurve: Gemessenes Phasenrauschspektrum eines Erbium-dotierten Faserlasers (EDL). Punktierte Kurve: Gemessenes Phasenrauschspektrum eines Ytterbium-dotierten Faserlasers (YDL).

sicherzustellen. Bei diesem Lasertyp wird der Kerr-Effekt in einer Erbium-dotierten Glasfaser ausgenutzt, der eine intensitätsabhängige Änderung der Polarisation verursacht. Dies bedeutet, dass die Polarisation des intensiven Zentralbereichs des Laserpulses nach dem Durchlaufen der Faser anders ist als die der Flanken. Stellt man ein Polarisationsfilter so ein, dass der Zentralteil des Pulses durchgelassen und die Flanken abgeschnitten werden, so wirkt das Filter als sättigbarer Absorber und bewirkt damit die Modenkopplung.

Erste Messungen haben gezeigt, dass das Hochfrequenzrauschen im Bereich von 1 kHz bis zur Nyquistfrequenz von 10 MHz hinreichend klein ist, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen (Abbildung 90). Bei den Messungen werden die periodischen Laserpulse auf einen Photodetektor geleitet, und es wird eine höhere Harmonische der Repetitionsfrequenz des Lasers mit

einem Bandpassfilter selektiert. Das Phasenrauschen dieses nun sinusförmigen Signals wird mit Hilfe eines Phasenrauschmessplatzes detektiert. Der momentan erreichte Wert von 10 fs liegt immer noch weit über dem theoretischen Grenzwert und wird vermutlich durch die Konversion von Amplituden- zu Phasenrauschen im Photodetektor bestimmt.

Im Bereich kleiner Frequenzen ($f < 1$ kHz) haben Faserlaser ein erhöhtes Rauschen, das durch Effekte wie die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex der Glasfaser, Mikrophonie und Vibrationen verursacht wird. Da Mikrowellenoszillatoren hier stabiler sind, wird der Faserlaser über eine Phasenrückkopplungsschleife an einen Mikrowellenoszillator gekoppelt. Auf lange Sicht ist auch denkbar, den Faserlaser an eine Atomuhr zu koppeln und so einen absoluten Frequenzstandard zur Verfügung zu stellen.