

Theoretische Physik

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

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

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

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

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

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

Aktivitäten in Hamburg

HERA-Physik und QCD

Hadronstruktur

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

Inklusive Teilchenproduktion

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

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

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

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

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

Vielschleifen-Korrekturen

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

Top-Quark Produktion

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

Vielfachstreuung bei hohen Energien

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

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

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

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

Instantonprozesse

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

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

Gittereichtheorie

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

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

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

Renormierung von Vier-Quarkoperatoren

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

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

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

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

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

Relativistische Korrekturen zum statischen Quark-Potenzial

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

B-Physik

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

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

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

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

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

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

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

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

Collider-Physik

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

Hochenergie-Limes

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

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

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

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

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

Higgs-Mechanismus

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

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

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

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

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

Supersymmetrie

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

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

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

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

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

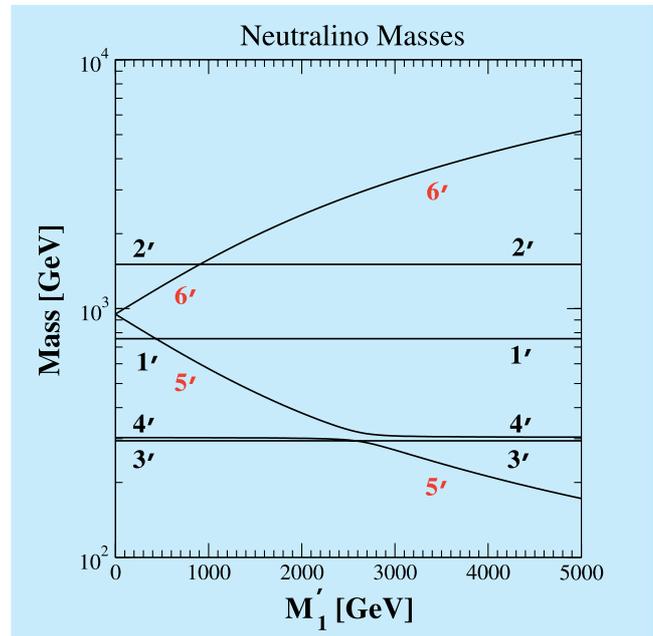


Abbildung 62: Massen der Neutralinos, Partner neutraler Eich- und Higgs-Bosonen in der um eine abelsche $U(1)$ -Eichsymmetrie erweiterten supersymmetrischen Minimal-Theorie. Der Parameter M'_1 kennzeichnet die möglichen Werte der $U(1)$ -Massenskala.

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

Kosmologie und Astroteilchenphysik

Dunkle Materie, dunkle Energie und Inflation

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

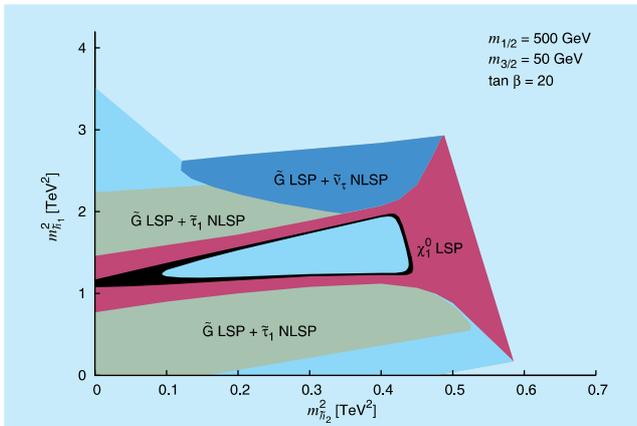


Abbildung 63: *Bereiche der Higgs-Massenparameter $m_{h_1}^2$ und $m_{h_2}^2$ mit Neutralino (χ_1^0) oder Gravitino \tilde{G} als LSP und skalarem Tau-Lepton ($\tilde{\tau}_1$) oder skalarem Neutrino ($\tilde{\nu}_\tau$) als NLSP.*

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

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

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

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

Teilchenphysik mit Neutrinoobservatorien

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

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

Vereinheitlichte Theorien und schwach wechselwirkende Teilchen

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

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

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

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

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

Stringtheorie

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

Stringtheorie in AdS Hintergründen

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

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

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

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

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

Stringkompaktifizierungen, Gravitation und Kosmologie

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

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

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

Mathematische Physik

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

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

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

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

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

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte

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

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

Virtuelle Institute:

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

Nachwuchsgruppen:

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

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

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

Außerdem sind die folgenden Drittmittelprojekte zu nennen:

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

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

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

Mitarbeit bei der Organisation von Konferenzen

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

Loops and Legs in Quantum Field Theory, Eisenach

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

Aktivitäten in Zeuthen

Gitter-Eichtheorie

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

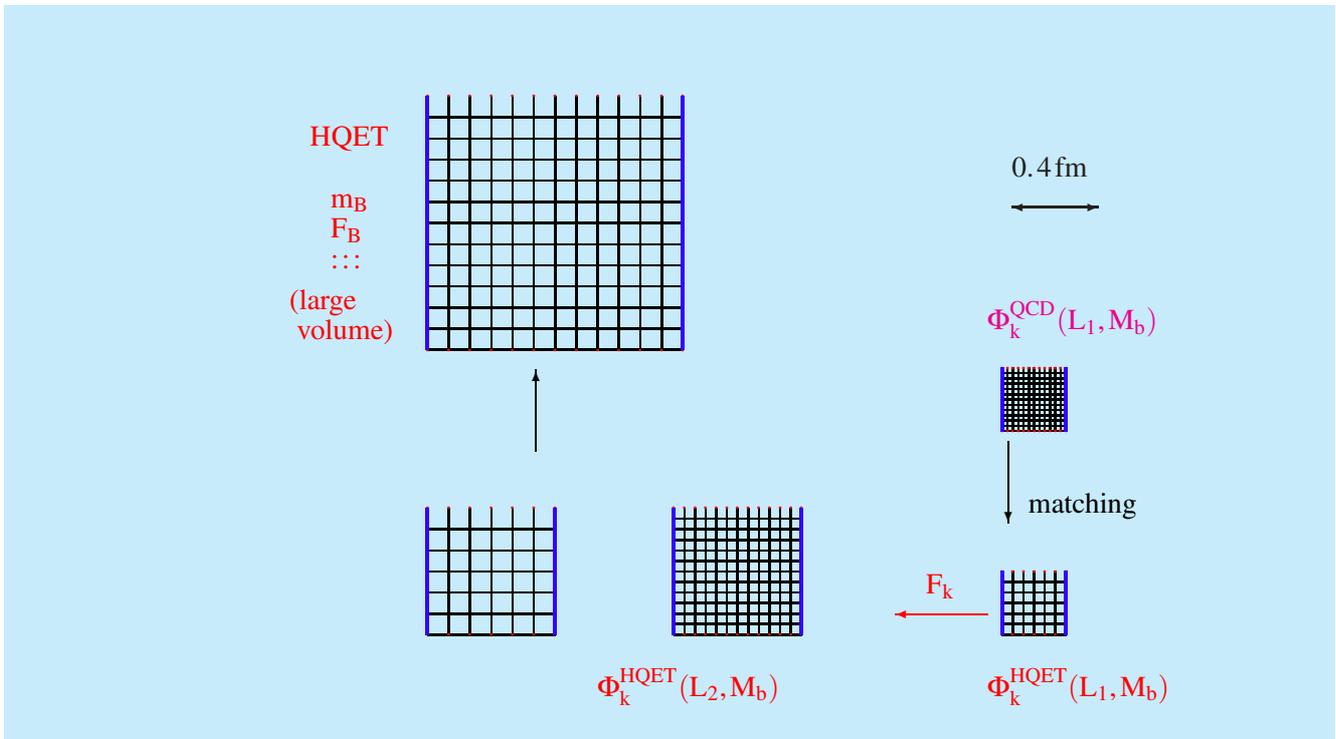


Abbildung 64: In der Berechnung von B-Mesonen werden Simulationen auf Gittern unterschiedlicher physikalischer Grösse und Auflösung kombiniert um Diskretisierungsfehler bei vertretbarem numerischen Aufwand zu minimieren.

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

Quantenchromodynamik und Flavorphysik

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

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

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

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

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

Das APE-Projekt: Entwicklung und Nutzung von Parallelrechnern

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

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

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

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

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

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

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

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

Physik an Beschleunigern

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

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

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

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

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

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

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

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

Konferenzen

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

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

Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte Aktivitäten am NIC

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

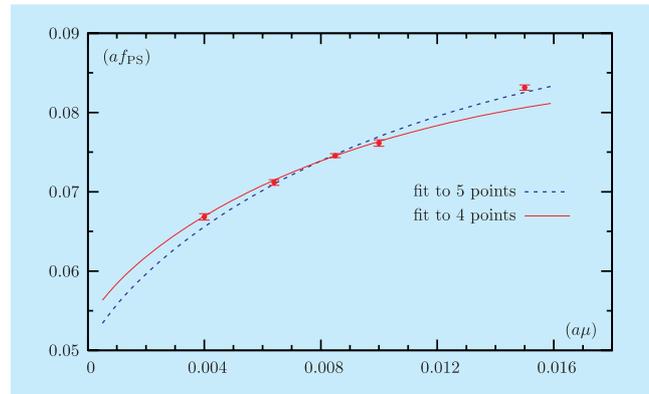


Abbildung 65: Die Zerfallskonstante des Pions af_{PS} als Funktion der Quarkmasse $a\mu$ zusammen mit einem Fit an die Vorhersage der chiralen Störungstheorie. Es werden zwei Fits gezeigt, einer bei dem alle Datenpunkte mitgenommen werden und einer, bei dem der größte Wert der Quarkmasse bei $a\mu =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

schungsprogramm wird der Schwerpunkt des Folgejahres sein.

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