

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 theore-

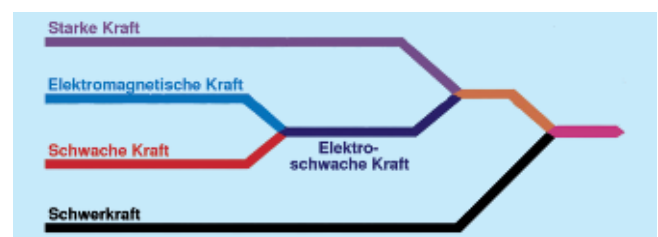


Abbildung 51: Vereinheitlichung der vier elementaren Wechselwirkungen.

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-inklusiven 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-inklusiven 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-inklusiven 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 $\Delta S = 2$ und $\Delta B = 2$ 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

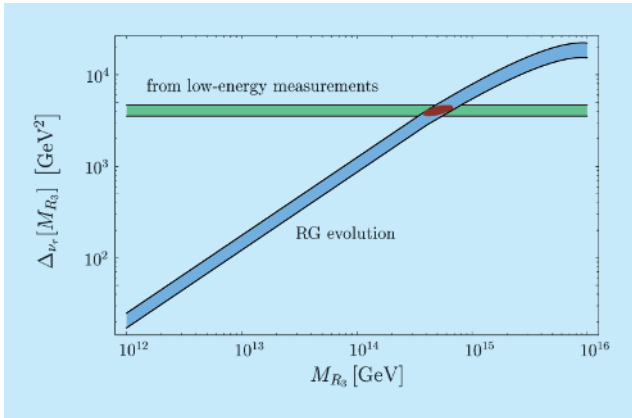


Abbildung 52: *Reduzierte Massenverschiebung Δ_{ν_τ} der Tau-Sleptonen und -Sneutrinos und Bestimmung der Massenskala der rechtshändigen Neutrinos.*

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-

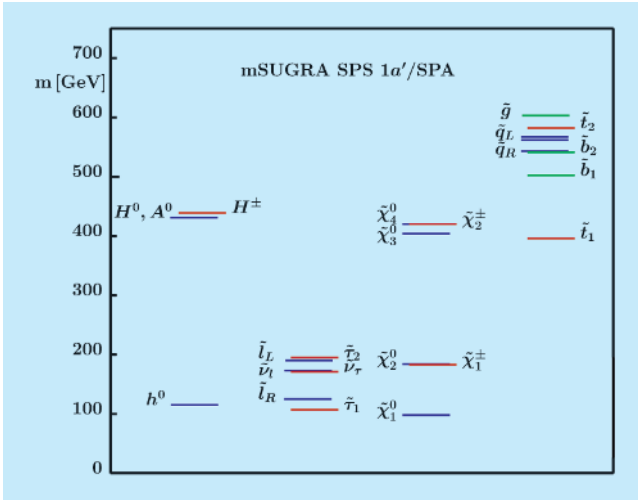


Abbildung 53: Spektrum des MSSM-Referenzszenarios SPS1a'.

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, wohingegen 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 Neutrino-Flusses 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 Polarisierung 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.

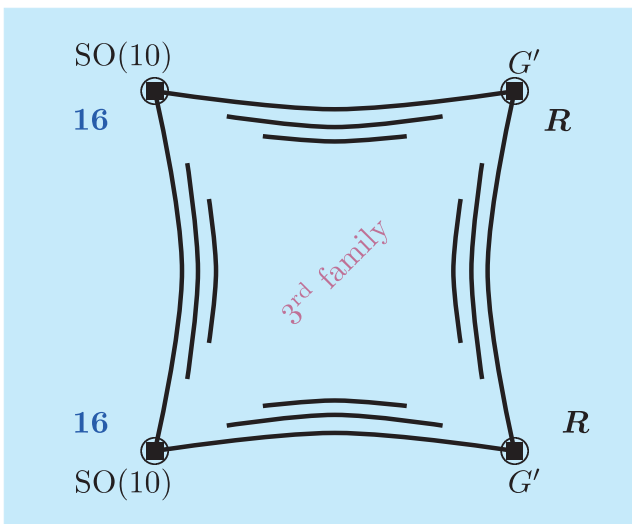


Abbildung 54: Ein 2+1-Familien-Modell. Zwei Quark-Lepton-Familien sind an Fixpunkten mit GUT-Symmetrie $SO(10)$ lokalisiert.

Das Massenspektrum supersymmetrischer Theorien hängt entscheidend vom Mechanismus der Supersymmetriebrechung ab. Sehr große Massen im TeV Bereich erhält man im KKLТ-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. Tieferreichende 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 Schrödingergleichung 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 Matricelemente 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-

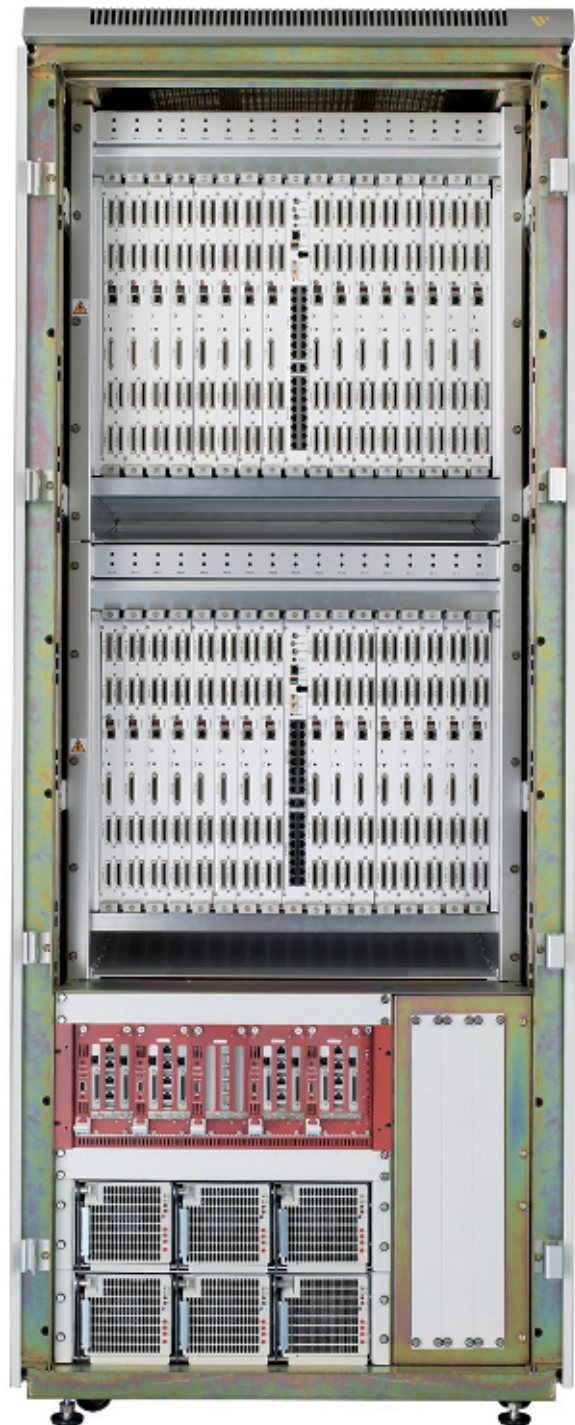


Abbildung 55: Ein apeNEXT Rechner mit 32 Boards und 512 Prozessoren (im Bild noch ohne Kommunikationskabel). Ein solches System hat ca. 0.6 Tflops Spitzenrechenleistung, benötigt ca. 0.6 m² Stellfläche und hat einen Leistungsbedarf von etwa 8 kW.

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 2048 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-

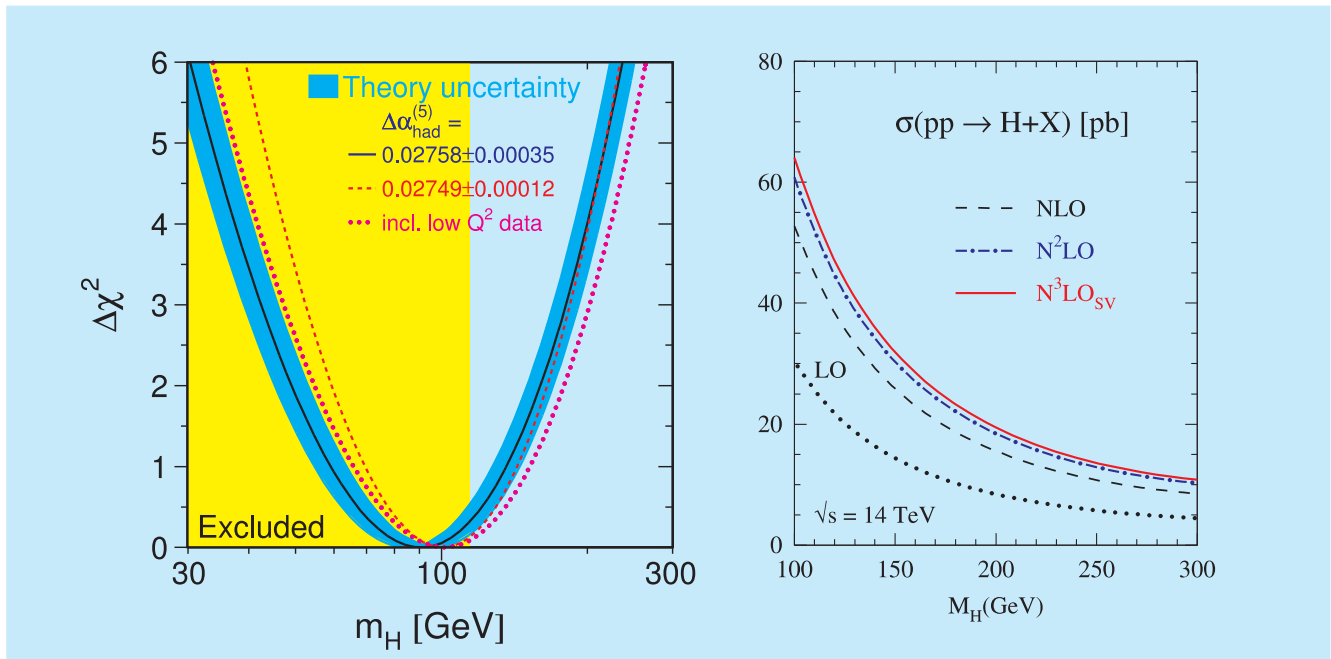


Abbildung 56: Links: Vorhersage der Higgs-Boson-Masse mit ZFITTER, aus einem Globalfit an Colliderdaten im Rahmen des Standardmodells (LEP Electroweak Working Group, CERN-PH-EP/2005-051 und http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/plots/summer2005/s05_blueband.eps; rechts: Vorhersage der Higgsproduktion mit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

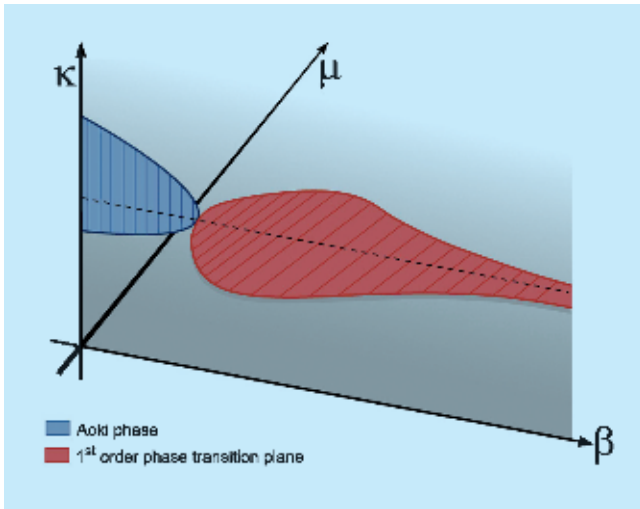


Abbildung 57: Das Bild des Phasendiagramms der Gitter-QCD nach heutigem Kenntnisstand. β ist die inverse Eichkopplung, κ die inverse Quarkmass und μ der Twisted-Mass Parameter.

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.

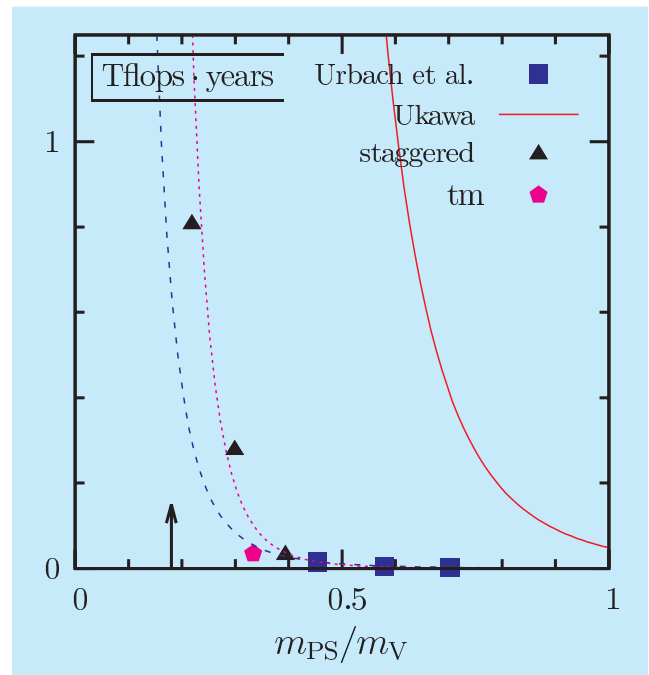


Abbildung 58: Das Verschieben des Berlin Wall durch neue Algorithmen-Entwicklungen.

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 verwerten. 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.