

# Theoretische Physik

**Gruppenleiter:** F. Schrempp (Hamburg), T. Riemann (Zeuthen)

**Die Forschungsfelder der Theorie-Gruppe 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 Themen der modernen Teilchenphysik.**

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

## Aktivitäten in Hamburg

### HERA-Physik und QCD

#### Hadronstruktur

##### Partondichten

Detaillierte Information über die Struktur des Protons kann in exklusiven Streuprozessen gewonnen werden. Eine wichtige Klasse von Prozessen, die bei HERA

gemessen worden sind, ist die Produktion von Vektormesonen, die besonders sensitiv ist auf die Gluonverteilung im Proton. In [DESY 07-117] wurde eine umfassende Studie der nächstführenden Korrekturen in  $\alpha_s$  für diesen Prozess vorgenommen und gezeigt, dass diese Korrekturen in einem weiten kinematischen Bereich numerisch groß sind. Ein Teil der  $\alpha_s$  Korrekturen ist durch die Skalenabhängigkeit der verallgemeinerten Quark- und Gluondichten im Proton gegeben, die in [DESY 07-195] mit Blick auf qualitative und quantitative Gesichtspunkte untersucht worden ist. Eine grundlegende Eigenschaft von Streuamplituden ist, dass sie Integralgleichungen in der Form sogenannter Dispersionsrelationen erfüllen. In der Beschreibung exklusiver Prozesse durch verallgemeinerte Partondichten sind diese Relationen nicht trivial, und in [DESY 07-094] wurde gezeigt, dass die Lorentzinvarianz eine wesentliche Rolle für die interne Konsistenz des Formalismus spielt. Der gleiche Formalismus beschreibt nicht nur die Produktion von Vektormesonen, sondern auch von  $\pi^+\pi^-$  Paaren. Die Kombination von HERMES-Daten und theoretischer Analyse in [DESY 07-032] hat gezeigt, dass dabei bestimmte Observable höchst sensitiv sind auf die Wechselwirkung von Pionen im Energiebereich um 1 GeV, was für eine Hochenergie-Reaktion zunächst überraschend ist.

Eine attraktive Eigenschaft verallgemeinerter Partondichten ist, dass mit ihrer Hilfe verschiedene Aspekte der Hadronstruktur in Beziehung gesetzt werden können. In [DESY 07-209] wurde ein quantitativer Zusammenhang hergestellt zwischen verschiedenen Asymmetrien von Strange-Quarks und Antiquarks im Proton, die Information über die Dynamik des Quark-Antiquark Sees enthalten. Auf der einen Seite war dies

die Asymmetrie in der Impulsverteilung, die in der tief-inelastischen Streuung gemessen werden kann, und auf der anderen Seite die Asymmetrie in der räumlichen Verteilung, welche durch Paritätsverletzung in der elastischen Elektron-Proton Streuung experimentell zugänglich ist. Der Formalismus verallgemeinerter Partondichten ist weiterhin geeignet für Berechnungen in der Gittertheorie. So wurde in [DESY 07-120] anhand von Gitterrechnungen gezeigt, dass eine starke Asymmetrie in der Verteilung transversal polarisierter Quarks in einem Pion besteht, die bemerkenswert ähnlich ist zu der entsprechenden Asymmetrie im Proton. Dies zeigt insbesondere, dass das Pion eine nichttriviale innere Spinstruktur hat, obwohl es selbst keinen Spin trägt.

Charakteristische Information zur Hadronstruktur ist auch in semi-inklusiven Prozessen zugänglich, deren Beschreibung in den letzten Jahren wichtige theoretische Fragen aufgeworfen hat. Ein Beispiel hierfür ist der Sivers-Effekt, der eine Korrelation von transversaler Polarisation und transversalem Impuls eines Quarks im Proton darstellt und für dessen Existenz der Austausch von Gluonen eine wesentliche Rolle spielt. In [DESY 07-028] wurde gezeigt, wie dieser Gluonenaustausch, der durch Wilson-Linien beschrieben werden kann, verantwortlich ist für eine starke Änderung in Größe und Vorzeichen der Sivers-Asymmetrie beim Übergang von der Lepton-Nukleon Streuung zur Produktion eines Photons und eines Hadron-Jets in Proton-Proton Kollisionen. Eine analoge Korrelation zwischen transversalem Spin und transversalem Impuls in der Quarkfragmentation ist durch den Collins-Effekt gegeben, der wichtig ist für die quantitative Interpretation bestimmter Spinasymmetrien im HERMES-Experiment. In [DESY 07-105] wurde die Collins-Fragmentationsfunktion in einem einfachen Modell berechnet und verglichen mit Daten aus der  $e^+e^-$  Annihilation im Belle-Experiment.

### Schwere Quarks

Die Beiträge schwerer Quarks ( $q = c, b$ ) zu den Protonstrukturfunktionen  $F_2^q(x, Q^2)$  und  $F_L^q(x, Q^2)$  wurde im Grenzfall kleiner Werte der Bjorkenschen Skalierungsvariable  $x$  in NLO betrachtet, und es wurden

kompakte Formeln für die Verhältnisse  $R_q = F_L^q/F_2^q$  hergeleitet, welche die Extraktion von  $F_2^q(x, Q^2)$  aus Messungen des doppelt-differentiellen Wirkungsquerschnitts der inklusiven tief-inelastischen Streuung bei HERA erleichtern. Dieser Zugang erklärt auf natürliche Weise, warum die Verhältnisse  $R_q$  näherungsweise unabhängig von  $x$  und den Einzelheiten der PDFn bei kleinen  $x$ -Werten sind [DESY 08-002, arXiv:0801.1502 [hep-ph]].

### Small-x Dynamik

Eine zentrale Größe der *small-x* Dynamik ist der sogenannte Triple-Pomeron Vertex; er liefert z. B. den Integralkern der nichtlinearen Balitsky-Kovchegov (BK) Evolutionsgleichung. In [DESY 07-185] wird dieser Vertex im Impulsraum näher untersucht, und es werden Unstimmigkeiten in einigen anderen nichtlinearen Evolutionsgleichungen aufgedeckt und diskutiert.

Bei der Analyse von HERA Daten im Bereich kleiner  $x$  Werte hat sich das QCD Dipolmodell als sehr hilfreich und erfolgreich erwiesen. Ein Grund für diesen Erfolg liegt in der Natur des Photons, das in der tiefinelastischen Streuung in ein Quark-Antiquark Paar dissoziiert und so auf natürliche Weise Farb-Dipole erzeugt. In [DESY 07-198] wird gezeigt, dass dieses Bild in der Proton-Proton Streuung am LHC nur begrenzt anwendbar ist. Insbesondere enthält das Proton Odderon-artige Konfigurationen, die in dem Dipolbild nicht enthalten sind.

### Instantonprozesse

Die wichtige Frage nach einer Nachweismöglichkeit von harten Instantonprozessen bei LHC wurde auch in 2007 weiterverfolgt [DESY-THESIS-2007-021]. Instantonen stellen einen grundlegenden, nicht-störungstheoretischen Aspekt der QCD dar, und ihr direkter experimenteller Nachweis steht noch immer aus. In die theoretischen Rechnungen flossen die Erfahrungen von zwei früheren HERA-Experimenten zur Instantonsuche ein, die auf Voraussagen aus der Theoriegruppe

aufbauten. Anders als bei HERA ist der führende Subprozess bei LHC durch zwei Gluonen initiiert. Die benötigte Virtualität wird daher im Endzustand in Form eines emittierten W-Bosons eingebracht. Damit wird die Virtualität zeitartig, was die Gluonresummation im Endzustand erheblich erschwert hat. Dieser wichtige Schritt konnte nun aber 2007 in Sattelpunkts-Näherung bewältigt werden [DESY-THESIS-2007-021]. Die zeitartige Virtualität führte zu einer überraschend hohen Verstärkung der Raten und der Ereignissignatur im Vergleich zum raumartigen Fall bei HERA. Damit vergrößert sich auch die Hoffnung auf einen Nachweis von Instantonprozessen am LHC, trotz der bekannten Untergrundproblematik, insbesondere am LHC.

## QCD und Stringtheorie

Die AdS/CFT Hypothese stellt einen Zusammenhang zwischen supersymmetrischen Eichtheorien und Stringtheorien dar und liefert die Möglichkeit, interessante Größen der Eichtheorien (anomale Dimensionen, cusp-anomale Dimension) auch im Bereich grosser Kopplungen zu berechnen. In [Theor. Math. Phys. 150: 213–224, 2007, Teor. Mat. Fiz. 150:249–262, 2007] und [J. Stat. Mech. 0710:P10003, 2007. e-Print: arXiv: 0704. 3586 [hep-th] wird dieser Zusammenhang weiter untersucht und eine Diskrepanz aufgedeckt, die erst in höherer Ordnung Störungstheorie sichtbar wird.

## Gittereichtheorie

Numerische Monte-Carlo-Simulationen sind geeignet, in Quantenfeldtheorien nicht-störungstheoretische Resultate zu erzielen. Zurzeit konzentrieren sich die Arbeiten auf die QCD und auf ähnliche Theorien, die damit verwandt sind.

In einer Kollaboration mit dem Institut für Theoretische Physik der Universität Münster wurde das Teilchenspektrum in QCD mit einem Quark-Flavour untersucht. Diese Theorie ist interessant wegen der Abwesenheit von Goldstone-Bosonen als Folge der Quanten-Anomalie

in der chiralen Symmetrie. Außerdem wird bei negativen Quarkmassen die spontane Brechung der CP-Symmetrie erwartet. Ermöglicht wird diese spontane Symmetriebrechung durch die Besonderheit, dass die Fermion-Determinante auf dem Gitter auch negativ sein kann. Für die Behandlung dieses Problems wurde ein effektiver Algorithmus entwickelt. Die Resultate wurden in [DESY 07-078] und auch auf der Internationalen Gitter-Konferenz in Regensburg präsentiert. Die numerischen Simulationen wurden auf den Supercomputern der KFA-JSC, Jülich gerechnet. Ähnliche Untersuchungen des Teilchenspektrums wurden auch in der Supersymmetrischen Yang-Mills Theorie mit SU(2) Eichgruppe durchgeführt.

In einer großen internationalen Kollaboration (*European Twisted Mass Collaboration* ETMC) mit mehr als 40 Teilnehmern aus 7 Ländern und 13 Instituten wurden verschiedene Größen (Hadronmassen, Zerfallskonstanten, Formfaktoren, Quarkmassen usw.) mit zwei leichten dynamischen Quark-Flavours (u- und d-Quarks) bestimmt ([DESY 06-236] und 12 Beiträge zur Regensburg-Konferenz). Der Vorteil der sogenannten *Twisted-Mass-Formulierung* ist die verbesserte chirale Symmetrie bei nicht-verschwindender Gitterkonstante, die eine leichtere Extrapolation zum Kontinuumslimes ermöglicht. In dieser Formulierung der Gitter-QCD wurden auch die ersten Schritte zur dynamischen Berücksichtigung der schwereren Quark-Flavours (s- und c-Quarks) eingeleitet.

## B-Physik

B-Physik ist ein fester Bestandteil der Arbeiten in der Theoriegruppe. Grundlage dieser Untersuchungen sind effektive Theorien, die eine störungstheoretische Formulierung der starken Wechselwirkung (QCD) zulassen. Eine dieser Theorien ist die sogenannte *Heavy Quark Effective Theorie* (HQET), die es erlaubt eine systematische  $1/m_b$ -Entwicklung der QCD-Lagrangedichte und Übergangmatrixelemente durchzuführen. Die HQET-Methoden gehören zu dem standard-theoretischen *Repertoire*, mit Hilfe dessen sich die Eigenschaften der B-Mesonen Zerfälle

quantitativ untersuchen lassen. Insbesondere haben die HQET-basierten Methoden es ermöglicht, die CKM-Matrixelemente aus Experimenten zu extrahieren. Das gilt vor allem für die Matrixelemente  $V_{ub}$  und  $V_{cb}$ . In diesem Zusammenhang wurden die nicht-störungstheoretischen Effekte in dem Zerfall  $B \rightarrow X_u \ell \nu_\ell$  mit Hilfe der sogenannten *Shape functions* untersucht [DESY 07-040]. Außerdem wurden die HQET-basierten Methoden und die QCD Summenregeln dafür benutzt, die Massen- und Zerfallsraten-Differenzen in dem  $B_s^0 - \bar{B}_s^0$  System zu berechnen [DESY 07-038].

B-Mesonen Zerfälle in effektiven Theorien beinhalten im Allgemeinen drei verschiedene Energieskalen:  $m_b$ ,  $\sqrt{m_b \Lambda_{\text{QCD}}}$  und  $\Lambda_{\text{QCD}}$  (hier ist  $m_b$  die b-Quarkmasse und  $\Lambda_{\text{QCD}}$  die QCD-Skala). Eine besondere Formulierung der QCD ist die sogenannte *Soft Collinear Effective Theorie* (SCET), die eine zentrale Rolle in der Herleitung einer Faktorisierungsformel für B-Mesonen Zerfälle spielt. SCET erlaubt es, die großen Effekte in die Zerfallsmatrixelemente aufzusummieren, die durch das *Running* zwischen diesen Skalen entstehen. Die SCET-basierten Methoden wurden dazu benutzt, eine präzise Theorie der Penguin-induzierten Übergänge  $B \rightarrow K^* \gamma$  und  $B_s \rightarrow \phi \gamma$  in  $O(\alpha_s^2)$  zu entwickeln [DESY 07-124]. Die abgeschätzten Zerfallsraten für  $B^\pm \rightarrow K^{*\pm} \gamma$ ,  $B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma$  und  $B_s^0 \rightarrow \phi \gamma$  sind mit deren experimentellen Messungen gut verträglich. Wie schon berichtet, wurden theoretische Abschätzungen für die Zerfälle  $B \rightarrow (K, K^*) \ell^+ \ell^-$  mit Hilfe der SCET in 2006 angefertigt.

Die Experimente an Tevatron haben einige  $B_s^0$ -Meson Zerfälle und CP-Asymmetrien gemessen. Auch das Belle Experiment am KEK hat einige  $B_s$ -Zerfälle beobachtet. Das LHCb Experiment am CERN wird demnächst in der Lage sein, eine ganze Reihe von  $B_s$ -Meson Zerfällen und CP-Asymmetrien genau zu messen. In Erwartung dessen wurden die Zerfallsraten und CP Asymmetrien in den sogenannten  $\bar{B}_s^0 \rightarrow PP$ ,  $\bar{B}_s^0 \rightarrow PV$  und  $\bar{B}_s^0 \rightarrow VV$  theoretisch abgeschätzt.  $P(V)$  sind leichte Pseudoskalare ( $\pi, K, \eta, \eta'$ ) und Vector ( $\rho, K^*, \omega, \phi$ ) Mesonen [DESY 07-021].

Theoretische Arbeiten zur B-Physik wurden in einem Übersichtsbericht zusammengefasst [DESY 07-

212]. Darin behandelt werden unter anderem die seltenen B-Mesonen Zerfälle, CP-verletzende Asymmetrien, und Massen-Differenzen zwischen Masseneigenzuständen in den neutralen B-mesonen Komplexen  $B_d^0 - \bar{B}_d^0$  und  $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ . Die Präzisionsmessungen der B-Mesonen Zerfälle liefern ein theoretisch konsistentes Bild innerhalb des Standardmodells. Die Arbeiten in der Theoriegruppe haben wesentlich zu diesen Ergebnissen beigetragen.

## Teilchenphysik am LHC/ILC

Von Bedeutung waren im Bereichszeitraum zahlreiche teilchentheoretische Problemstellungen am CERN Protonenbeschleuniger LHC, der in Kürze in Betrieb gehen wird, sowie von Vorbereitungen zur Physik am TeV  $e^+e^-$  Linearbeschleuniger ILC. Beide Maschinen versprechen, unsere Kenntnisse über die fundamentalen Strukturen der Materie und ihrer Wechselwirkungen wesentlich zu erweitern und zu vertiefen. Insbesondere ging es um Präzisionsvorhersagen für die Hadron- und Eichboson-Erzeugung, Renormierung instabiler Fermionen und Supersymmetrie.

## Hadronen-Erzeugung

Im Rahmen des Partonmodells der QCD wird die inklusive Erzeugung von Hadronen (h) mit Hilfe von Fragmentierungsfunktionen (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 Skalenverhalten ( $\mu$ ). Im Bereich mittlerer bis großer Impulsüberträge  $x$  vom Mutterparton  $a$  an das Hadron  $h$  wird die  $\mu$ -Abhängigkeit der FFn durch die wohlbekannten Dokshitzer-Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi-Evolutionsgleichungen (DGLAP) beschrieben. Die analytische Lösung dieser Gleichungen im Mellin-Raum wurde nun durch die Aufsummierung der im Grenzfall  $x \rightarrow 1$  auftretenden Divergenzen verbessert. In nächstführender Ordnung

(NLO) und unter Berücksichtigung der nächstführenden Logarithmen wurden explizite Ergebnisse angegeben. Die numerische Auswertung ergab erwartungsgemäß, dass der theoretische Fehler durch die Aufsummierung in einem weiten  $x$ -Bereich verringert wird [DESY 07-151, arXiv:0712.0481 [hep-ph]].

FFn beinhalten langreichweitige Effekte der starken Wechselwirkung und können daher nicht im Rahmen der Störungstheorie berechnet werden, sondern müssen, ähnlich wie Partondichtefunktionen (PDFn), 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. Ausgehend vom masselosen Partonmodell wurde ein rigoroser theoretischer Formalismus, das *General-Mass Variable-Flavour-Number Scheme* (GM-VFNS), entwickelt, der einerseits Massenkorrekturen vollständig berücksichtigt und andererseits die Universalität und Skalenverletzung der FFn auf der Grundlage des Faktorisierungstheorems gewährleistet. Im Rahmen dieses Formalismus wurden erstmals FFn bestimmt, welche Quark- und Hadronmasseneffekte konsistent berücksichtigen. Insbesondere wurden FFn für  $D^0$ -,  $D^+$ - und  $D^{*+}$ -Mesonen durch einen globalen Fit an alle verfügbaren experimentellen  $e^+e^-$ -Daten in NLO extrahiert. Diese Daten stammen von der Energieregion knapp unterhalb der  $\Upsilon(4S)$ -Resonanz (Belle, CLEO) bzw. von der  $Z^0$ -Resonanz (ALEPH, OPAL) und erlauben aufgrund der langen Evolutionsstrecke einen signifikanten Test der Skalenverletzung. Hierbei erwies sich die Berücksichtigung der elektromagnetischen Anfangsstrahlung als unverzichtbar [DESY 07-219].

Im Rahmen des GM-VFNS wurde auch die inklusive Hadroproduktion von Hadronen mit Bottom-Flavour unter Tevatron-Bedingungen in NLO untersucht. Im Widerspruch zu einer früheren Vermutung anderer Autoren bewirken Masseneffekte im Bereich mittlerer Transversalimpulse ( $2m_b < p_T < 4m_b$ ) einen moderaten Anstieg des Wirkungsquerschnittes im Vergleich zur masselosen Theorie, um ca. 20% bei  $p_T = 2m_b$ ,

der mit zunehmenden  $p_T$ -Werten rasch abklingt. Unter Verwendung von FFn, die eigens durch einen Fit an LEP1-Daten von ALEPH und OPAL bestimmt worden waren, wurde gute Übereinstimmung mit CDF-Daten aus Tevatron-Run II gefunden, wodurch sowohl Skalenverletzung als auch Universalität der FFn bestätigt wurden. Der altbekannte Mangel, dass die CDF-Daten die theoretische NLO-Vorhersage im herkömmlichen Schema (NLO QCD), bei dem massive  $b$ -Quarks nur im Endzustand auftreten, um etwa drei Standardabweichungen übertreffen, konnte auf verblüffend einfache Weise beseitigt werden, nämlich durch Verwendung des derzeitigen Weltmittelwertes der starken Kopplungskonstante  $\alpha_s$  und zeitgemäßer PDFn [DESY 07-066].

Die Beiträge schwerer Quarks ( $q = c, b$ ) zu den Protonstrukturfunktionen  $F_2^q(x, Q^2)$  and  $F_L^q(x, Q^2)$  wurden im Grenzfall kleiner Werte der Bjorkenschen Skalierungsvariable  $x$  in NLO betrachtet, und es wurden kompakte Formeln für die Verhältnisse  $R_q = F_L^q/F_2^q$  hergeleitet, welche die Extraktion von  $F_2^q(x, Q^2)$  aus Messungen des doppelt-differentiellen Wirkungsquerschnitts der inklusiven tief-inelastischen Streuung bei HERA erleichtern. Dieser Zugang erklärt auf natürliche Weise, warum die Verhältnisse  $R_q$  näherungsweise unabhängig von  $x$  und den Einzelheiten der PDFn bei kleinen  $x$ -Werten sind [DESY 08-002].

## Eichboson-Erzeugung

Die elektroschwachen Strahlungskorrekturen zum Wirkungsquerschnitt der inklusiven Hadroproduktion einzelner  $W^\pm$ -Bosonen mit endlichem Transversalimpuls wurden vollständig in der Ein-Schleifen-Näherung berechnet. Um infrarotsichere Vorhersagen bei gleicher Definition von quark- und gluoninitiierten Hadronenjets ( $j$ ) zu erhalten, wurden sowohl die  $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrekturen zur  $W^\pm + j$ -Erzeugung als auch die  $\mathcal{O}(\alpha_s)$ -Korrekturen zur  $W^\pm + \gamma$ -Erzeugung berücksichtigt, wobei  $\alpha$  und  $\alpha_s$  die elektromagnetische bzw. starke Kopplungskonstante bezeichnen. Ferner wurden die Beiträge der  $W + j$ -Photoproduktion mit einem direkten oder aufgelösten Photon im Anfangszustand in LO betrachtet.

Es wurden integrierte Wirkungsquerschnitte als Funktion eines Mindest- $p_T$ -Schnittes und  $p_T$ -Verteilungen zum Vergleich mit Messungen am Tevatron und am LHC bereitgestellt und die theoretische Unsicherheit abgeschätzt [DESY 07-103].

Eine unabhängige Untersuchung der  $p_T$ -Verteilung von  $W^\pm$ -Bosonen, die am Tevatron oder am LHC einzeln erzeugt werden, beschränkte sich auf die rein elektroschwachen Korrekturen der Ordnung  $\mathcal{O}(\alpha)$ , wobei Übereinstimmung mit der oben genannten Arbeit gefunden wurde. Der Schwerpunkt lag hier auf der Bereitstellung von Näherungsformeln für den Hochenergiebereich, wo große Sudakov-Logarithmen auftreten, die typischerweise von der Form  $\ln(\hat{s}/M_W^2)$  sind, wobei  $\sqrt{\hat{s}}$  die Schwerpunktsenergie des partonischen Stoßprozesses bezeichnet. Diese Logarithmen sind aus allgemeinen Untersuchungen bis zu zwei Quantenschleifen bekannt [DESY 07-041;DESY 07-112].

Die Formfaktoren für die Kopplung eines masselosen bzw. massiven Eichbosons an eine masselose Fermionlinie wurden für beliebige Werte des Impulsübertrags  $q^2$  im Rahmen der  $U(1)\times U(1)$ - bzw.  $SU(2)\times U(1)$ -Eichtheorie in der Zwei-Schleifen-Näherung berechnet. Das asymptotische Verhalten für  $q^2 \rightarrow \infty$  wurde mit einer neulich durchgeführten Berechnung der entsprechenden Sudakov-Logarithmen verglichen. Diese Ergebnisse werden für die Berechnung von Strahlungskorrekturen zur  $Z^0$ -Erzeugung mit Hadronen- und Leptonen-Beschleunigern benötigt [DESY 07-024].

## Renormierung

Die Konzepte der Polmasse und -breite wurden im Rahmen paritätsverletzender Eichtheorien, etwa des Standardmodells, auf instabile Fermionen erweitert. Im Gegensatz zu den üblichen On-Shell-Definitionen sind diese Konzepte eichunabhängig und vermeiden schwerwiegende unphysikalische Singularitäten. Diese Eigenschaften sind von großer Wichtigkeit, weil die meisten Fermionen in der Natur instabile Teilchen sind. Es wurden auch allgemeine Ausdrücke für die unrenormierten und renormierten Versionen der aufsummierten Propagatoren instabiler Fermionen und deren

Wellenfunktionsrenormierungskonstanten hergeleitet [DESY 08-001].

## Supersymmetrie

Eine der zentralen Prämissen von supersymmetrischen Theorien ist die Identität von Yukawa-Kopplungen mit korrespondierenden Eichkopplungen, wodurch die Extrapolation der Theorie bis zur Planck-Skala auf natürliche Weise gewährleistet wird. Im elektroschwachen Sektor kann die Identität der beiden Kopplungsarten an einem Lepton Collider (LC) mit hoher Genauigkeit experimentell geprüft werden. Die Produktion von Squarks und Gluinos, den Partnerteilchen von Quarks und Gluonen, bietet sich zur Messung der supersymmetrischen QCD-Kopplungen am LHC an. Es sind die Möglichkeiten einer solchen Messung untersucht worden mit dem Resultat, dass die Identität der Kopplungen experimentell im Prozent-Bereich nachgewiesen werden kann. Eine signifikante Verbesserung kann durch kohärente Analysen von Produktions- und Zerfallskanälen bei LHC und LC erreicht werden [DESY 07-035].

Die stabile Fortsetzung von supersymmetrischen Theorien zu hohen Energien eröffnet die Möglichkeit, die physikalischen Wurzeln von Materie und Wechselwirkungen an der Planck-Skala experimentell zu erforschen. Diese Programmatik ist für LHC und LC in der Vergangenheit im Rahmen der supersymmetrischen  $SU(5)$ -Vereinigungstheorie intensiv studiert worden. Der Nachweis kleiner Neutrinomassen legt die Erweiterung dieses Konzepts auf die  $SO(10)$ -Symmetrie nahe. Da die experimentell beobachteten Neutrinomassen in diesem Rahmen aufgrund des Seesaw-Mechanismus erzeugt werden, stellt sich die Aufgabe, auch die Massen der sehr schweren rechts-chiralen Neutrinos zu bestimmen. Es konnte gezeigt werden, dass in universellen supersymmetrischen Theorien diese Massen in der Nähe der  $SO(10)$ -Vereinigungsskala aus der Massendifferenz von Seletron und Stau, der Partner von Elektron und  $\tau$ -Lepton, bestimmt werden können. So ermöglichen Präzisionsexperimente an Collidern die experimentelle Erforschung der Wurzeln der Physik an der Planck-Skala. [DESY 07-199].

## Kosmologie und Astroteilchenphysik

### Dunkle Materie, dunkle Energie und Inflation

In supersymmetrischen Theorien ist das leichteste Superpartikelchen, insbesondere das Neutralino oder das Gravitino, ein attraktiver Kandidat für die beobachtete dunkle Materie. Superpartikelchen unterscheiden sich von gewöhnlichen Teilchen durch eine diskrete Quantenzahl, die R-Parität. In der Regel wird angenommen, dass die R-Parität erhalten ist. Das leichteste Superpartikelchen, und die dunkle Materie, sind dann stabil. In [DESY UT-07-03] wurde jedoch gezeigt, dass R-Parität und Leptonzahl gemeinsam spontan gebrochen werden können. Dies führt zu instabilen Gravitinos mit einer Lebensdauer, die sehr viel größer ist als das Alter des Universums. Dunkle Materie aus quasi-stabilen Gravitinos ist konsistent mit der Erklärung der kosmologischen Materie-Antimaterie-Asymmetrie durch Leptogenese [DESY 07-186].

Instabile Gravitinos können in Neutrino-Photon-Paare zerfallen. Dies führt zu einem charakteristischen Fluss von Photonen, der mit der von der EGRET-Kollaboration beobachteten Anomalie im Photon-Spektrum konsistent ist [DESY 07-128]. Das vorhergesagte Photon-Spektrum hat eine charakteristische Signatur, die mit dem Experiment GLAST beobachtet werden könnte [DESY 07-158] (siehe Abbildung 92).

Im Rahmen von Supergravitations- und Stringtheorien sind Moduli-Felder interessante Kandidaten für das Inflatonfeld. Ihr Zerfall erzeugt Gravitinos, die zu einer zu großen Dichte dunkler Materie führen können [DESY 07-061]. Dies führt zu starken Einschränkungen an die verschiedenen Mechanismen der Supersymmetriebrechung [DESY 07-001, 07-019, 07-156]. Ähnliches gilt für die Realisierung des Peccei-Quinn-Mechanismus zur Lösung des CP-Problems der starken Wechselwirkung mit Hilfe eines Axionfeldes [DESY 07-217]. In supersymmetrischen Theorien sind Axion und ein Dilaton Bestandteile eines einzigen Superfeldes. Die

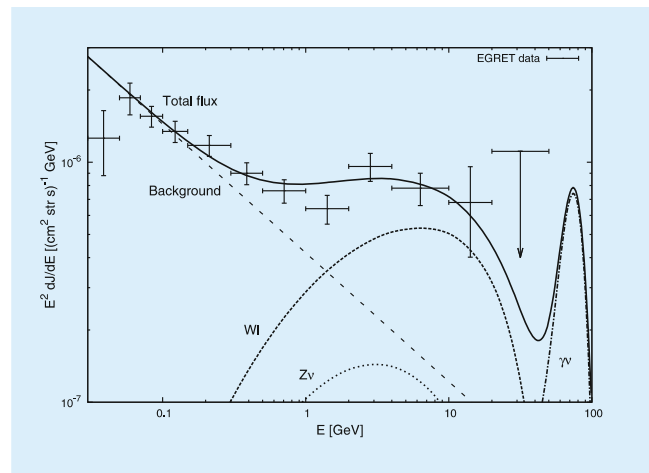


Abbildung 92: Beiträge zum Photonfluss durch verschiedene Gravitino-Zerfälle: W-Boson/Lepton (Wl), Z-Boson/Neutrino (Zv) und Photon/Neutrino ( $\gamma\nu$ ), als Funktion der Photonenergie; Gravitinomasse:  $m_{3/2} = 150 \text{ GeV}$ , Gravitinolebensdauer:  $\tau_{3/2} = 2 \times 10^{26} \text{ s}$ .

Dynamik des gekoppelten Axion-Dilaton Systems ist ein interessantes Modell für die dunkle Energie [DESY 07-145].

Die Daten der WMAP-Kollaboration für die kosmische Hintergrundstrahlung schränken Inflationsmodelle stark ein. Dies wird illustriert durch den Effekt von möglichen Oszillationen im sonst flachen primordialen Spektrum der Dichtefluktuationen [07-004]. Interessante Modelle für Inflation lassen sich in Supergravitationsmodellen mit Hilfe von D-Termen konstruieren [DESY 07-187]. Sie sind überprüfbar durch Vorhersagen für den spektralen Index von Dichtefluktuationen [DESY 07-210].

Im Oktober 2007 wurde am II. Institut für theoretische Physik der Universität Hamburg eine neue Gruppe für theoretische Astroteilchenphysik unter der Leitung von Prof. Dr. Günter Sigl eingerichtet. Die folgenden Abschnitte sollen auch einen Eindruck von den derzeit verfolgten Forschungsschwerpunkten dieser Arbeitsgruppe geben. Nicht all die genannten Ergebnisse sind tatsächlich in der Zeit nach dem 1.10. erzielt worden.

Ein wichtiger Aspekt der Forschung sind Ursprung und Ausbreitung hochenergetischer geladener kos-

mischer Strahlung sowie neutraler Sekundärteilchen wie hochenergetische gamma-Strahlung und Neutrinos. Hierzu wird CRPropa, ein unter der Adresse <http://apcauger.in2p3.fr/CRPropa/index.php> öffentlich verfügbarer numerischer code, weiterentwickelt. Das Ziel ist, *multimessenger* Signaturen verschiedener Szenarien für den Ursprung der kosmischen Strahlung systematisch vorherzusagen. Beispielsweise wird untersucht, ob mögliche Quellen wie aktive Galaxien nicht nur in höchstenergetischer kosmischer Strahlung mit Instrumenten wie dem Pierre Auger Observatorium sondern auch in TeV gamma-Strahlung mit Instrumenten wie H.E.S.S. und MAGIC, sowie auch in Neutrinos mit Neutrino-Teleskopen wie ICECUBE und dem zukünftigen europäischen km<sup>3</sup>net beobachtet werden können.

Auch die Signaturen von Physik jenseits des Standardmodells der fundamentalen Wechselwirkungen sind ein wichtiges Forschungsgebiet. Eines der diesbezüglich untersuchten Themen sind Einschränkungen an mögliche Verletzungen der Lorentz Symmetrie aus der chemischen Zusammensetzung höchstenergetischer kosmischer Strahlung [arXiv:0708.1737 [astro-ph]]. Ferner wurden mögliche Signaturen einer Mischung zwischen Axionen und Photonen in den Spektren von aktiven Galaxien untersucht. Solche Signaturen sind teilweise beobachtbar für Axion-Photon Kopplungen, die bisher nicht experimentell ausgeschlossen sind [arXiv:0708.1144 [astro-ph]]. Diese theoretischen Untersuchungen stellen einen wichtigen komplementären Ansatz zu den experimentellen Aktivitäten am DESY um mögliche Axion-Photon Kopplungen dar.

Ferner wird auch die indirekte Detektion von dunkler Materie untersucht. Die Annihilation von dunkler Materie in Form von noch nicht entdeckten schweren Teilchen, deren Existenz aber von vielen Erweiterungen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik vorausgesagt werden, können zu interessanten und detektierbaren Signaturen in den Flüssen hochenergetischer kosmischer Strahlung, gamma-Strahlung und Neutrinos führen. Dabei erzeugte Elektronen und Positronen produzieren in kosmischen Magnetfeldern auch Synchrotronstrahlung, die damit eine weitere mögliche Signatur darstellt. All diese Signaturen müssen aber

von Beiträgen „normaler“ astrophysikalischer Prozesse unterschieden werden.

Um zu verstehen, welche Rolle Neutrinos und Neutrino-Oszillationen, und insbesondere Effekte der Neutrino-Selbstwechselwirkung, für Supernovae des Typs II spielen, wurden mögliche Signaturen in den Flüssen der Neutrinos der drei verschiedenen flavors in zukünftigen Detektoren der Megatonnen-Skala untersucht. Eine Serie von Arbeiten, von denen drei während des Berichtszeitraums publiziert wurden [arXiv:0706.2498 [astro-ph]; arXiv:0712.1137 [astro-ph]; arXiv:0712.2176 [hep-ph]], liefern die Grundlage hierzu.

Ein weiteres Ziel der Gruppe besteht darin, den *multimessenger* Ansatz auf Gravitationswellen auszudehnen. Die elektromagnetischen Emissionen von sehr leuchtkräftigen aktiven Galaxienkernen erstrecken sich vom Infrarotbereich über Röntgenstrahlung bis zu gamma-Strahlung und werden von der Akkretion von Gas auf das zentrale supermassive schwarze Loch erzeugt. Sind in dieser Akkretion zum Beispiel kompakte Objekte eingelagert, werden Gravitationswellen emittiert, deren Intensität mit der elektromagnetischen Emission korreliert. In Zukunft sollen Quellen modelliert werden, welche sowohl Photonen (und möglicherweise auch geladene kosmische Strahlung sowie Neutrinos) als auch Gravitationswellen emittieren.

## Vereinheitlichte Theorien

Die Symmetrien des Standardmodells und die Quantenzahlen von Quarks und Leptonen weisen auf eine Vereinigung aller Kräfte bei sehr kleinen Abständen hin. Zusammen mit der Gravitationskraft können vereinheitlichte Theorien (GUTs) im Rahmen von Stringtheorien beschrieben werden. Diese Vereinigung aller Kräfte schränkt das Massenspektrum der Teilchen im Standardmodell ein und legt auch die Existenz neuer, sehr schwerer und sehr leichter, Elementarteilchen nahe.

Theoretisch attraktiv sind vor allem vereinheitlichte Theorien in mehr als vier Raum-Zeit-Dimensionen, die als Zwischenschritt zwischen dem Standardmodell



und Stringtheorien auftreten können. Ein entsprechendes Modell in sechs Dimensionen wurde in [DESY 07-072] konstruiert. Die dritte Quark-Lepton Familie setzt sich dabei aus zwei verschiedenen Familien in sechs Dimensionen zusammen, was einen starken Einfluss auf die Yukawa-Kopplungen der Theorie in vier Dimensionen hat. Für ein verwandtes SO(10)-GUT-Modell in sechs Dimensionen wurde die Struktur von Quark- und Lepton-Massenmatrizen im Detail untersucht, vor allem im Hinblick auf Neutrinomassen und CP-Verletzung [DESY 07-141]. Eine entscheidende Rolle spielt dabei der Seesaw-Mechanismus, der auch in Kompaktifizierungen der heterotischen Stringtheorie realisiert werden kann [DESY 07-030].

Der Seesaw-Mechanismus zur Erklärung der leichten Neutrinomassen beruht auf der Existenz schwerer Majorana-Neutrinos, die über Strahlungskorrekturen auch zu radiativen Zerfällen von Muon- und Tau-Neutrinos führen; im Rahmen vereinheitlichter Theorien ergeben sich ebenfalls Vorhersagen für Mischungen und Zerfälle von B-Mesonen [DESY 07-201]. In Modellen mit dem Gravitino als leichtestem Superpartikelchen kann ein skalares Neutrino das nächstschwerere Superpartikelchen sein, was zu charakteristischen Signaturen am LHC führen kann [DESY 07-029].

Erweiterungen des Standardmodells, die auf Supersymmetrie, Supergravitation oder Stringtheorie beruhen, scheinen unisono die Existenz eines *versteckten Sektors* von neuen Teilchen und Wechselwirkungen vorauszusetzen. Die versteckten Teilchen haben nur eine sehr schwache Wechselwirkung mit den *sichtbaren* Teilchen des Standardmodells. Einige dieser hypothetischen Teilchen könnten durchaus sehr leicht ( $< \text{eV}$ ) sein und daher bei Experimenten an hochenergetischen Beschleunigern keine messbaren Signaturen hinterlassen. Laserexperimente, wie das *Axion-Like Particle Search* (ALPS) Experiment [DESY 07-014] bei DESY, haben dagegen ein großes Entdeckungspotential für leichte versteckte Teilchen mit potentiell sehr kleinen Kopplungen zu Photonen [DESY 07-088, 162, 207], wie das Beispiel von Abbildung 93 zeigt.

*Licht-durch-die-Wand* (LSW) Experimente, wie ALPS bei DESY, sind derzeit die im meV Massenbereich

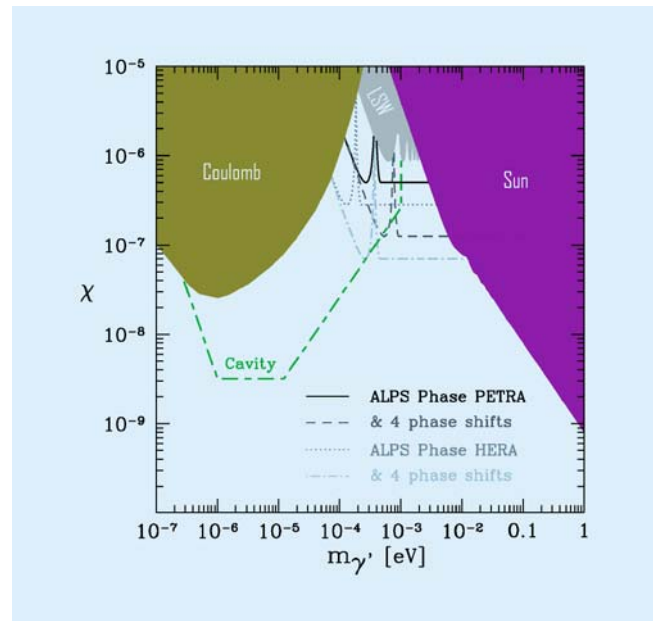


Abbildung 93: Experimentelle Grenzen an den kinetischen Mischungswinkel  $\chi$  von versteckten Photonen  $\gamma'$  mit den sichtbaren Photonen, als Funktion von deren Masse  $m_{\gamma'}$ .

am empfindlichsten Experimente, mit großem Entdeckungspotential [DESY 07-207]. Deren Empfindlichkeit kann durch den Einsatz von Phasenschiebern (*phase shifts*) entscheidend verbessert werden [DESY 07-081]. Experimente mit Hohlraumresonatoren (*cavity*) könnten in naher Zukunft einen weiteren noch unerforschten Bereich hin zu kleineren Mischungswinkeln erschließen [DESY 07-099].

## 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 bearbeitet mit Forschungen 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 ganz verschiedene Fragestellungen der theoretischen Physik. Insbesondere eröffnet sich durch die sogenannte AdS/CFT Korrespondenz ein völlig neuartiger Weg zur Behandlung stark gekoppelter Eichtheorien (z. B. der Quantenchromodynamik, siehe auch [DESY-07-044]). Interessante Einsichten lassen sich sogar schon aus dem Gravitationslimes gewinnen [JHEP 0705:075, 2007, DESY-07-085].

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 interessanter Eichtheorien zu bestimmen. In sehr speziellen Grenzfällen lassen sich die notwendigen Berechnungen schon heute durchführen. 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 gelungen, mehrere Serien nichtlinearer Sigma Modelle mit  $d$ -dimensionaler superkonformer Symmetrie vollständig zu lösen [DESY-07-074]. Aus der vorgeschlagen Konstruktion ergaben sich auch neue Einblicke in Modelle, die z. B. bei der Beschreibung kritischer Phänomene in 2-dimensionalen Grenzflächen eine wichtige Rolle spielen. Randbedingungen in derartigen Quantenfeldtheorien mit interner Supersymmetrie wurden zum ersten Mal in [DESY-07-109] systematisch klassifiziert. Die Konstruktion einer weiteren Klasse von Theorien mit interner Supersymmetrie wurde in [DESY-07-190] thematisiert. Dabei kamen ganz neue Techniken zum Einsatz, die zuvor in [DESY-07-075] entwickelt worden waren.

Die anomalen Dimensionen einer Eichtheorie hängen im allgemeinen kontinuierlich von den Kopplungskon-

stanten ab. Folgt man den Aussagen der AdS/CFT Korrespondenz, dann ergibt sich eine ähnliche kontinuierliche Abhängigkeit des Massenspektrums in der korrespondierenden Stringtheorie von den Parametern der Hintergrundgeometrie. Strings in AdS-Räumen sollten daher durch nicht-lineare Sigma Modelle mit kontinuierlich variierenden kritischen Exponenten beschrieben werden. Ein spezielles Beispiel wurde exemplarisch untersucht [DESY-07-226]. In dieser Arbeit konnte die Abhängigkeit spezieller Exponenten von den geometrischen Parametern effizient berechnet werden.

Mit dem wichtigen Sinh-Gordon Modell war noch eine andere kontinuierliche Familie von Modellen Gegenstand intensiver Untersuchungen [hep-th/0702214]. In diesem Kontext wurden moderne Methoden aus der Theorie integrierbarer Systeme zur exakten Bestimmung des Spektrums eingesetzt und weiterentwickelt. Wichtig war dabei vor allem eine geeignete Verallgemeinerung des Bethe-Ansatzes, der auf Modelle mit nicht-kompakter Raum-Zeit nicht anwendbar ist. Die Sinh-Gordon Theorie gilt als Modell für die fünfte Dimension von AdS<sub>5</sub> Hintergründen. Methoden aus der Theorie von integrierbaren Systemen wurden auch zur Analyse anomaler Dimensionen in der  $N=4$  supersymmetrischen Yang-Mills Theorie in vier Raum-Zeit Dimensionen nutzbringend verwendet [DESY-07-216]. Anwendungen auf spezielle Gittermodelle standen in [DESY-07-222] im Vordergrund.

## Stringkompaktifizierungen, Gravitation und Kosmologie

Stringkompaktifizierungen auf sogenannten verallgemeinerten Calabi-Yau Mannigfaltigkeiten sind insbesondere wegen Ihrer phenomologischen Eigenschaften von großem Interesse. Die Arbeitsgruppe *Stringtheorie* am II. Theoretischen Institut der Universität Hamburg arbeitete im Berichtszeitraum vor allem an Aspekten von sogenannten T-Dualität in verallgemeinerten Stringkompaktifizierungen in [DESY-07-189, DESY-07-127]. Stabile de Sitter Grundzustände wurden sowohl im frühen wie auch im späten Universum untersucht.

Die Emmy Noether-Gruppe *Geometrie in Gravitation und Kosmologie* hat sich mit der Untersuchung von Mannigfaltigkeiten mit Flächenmaß und deren Gravitationstheorie beschäftigt. Diese Mannigfaltigkeiten stellen verallgemeinerte geometrische Hintergründe dar, auf denen Strings als natürliche fundamentale Objekte formuliert werden können. Die Dynamik von effektiven Punktteilchen wurde aus ersten Prinzipien abgeleitet und erfolgreich zur Beschreibung eines konsistenten Modells des Sonnensystems eingesetzt. In der Kosmologie wurde gezeigt, dass sich das frühe strahlungsdominierte Universum wie in der Einsteinschen Theorie verhält, aber dass das späte Universum eine beschleunigende Lösung erlaubt [JCAP 0712:013, 2007, arXiv:0711.3771]

Für die Untersuchung zeitabhängiger Hintergründe in der Stringtheorie erscheint die sogenannte Stringfeldtheorie als ein vielversprechender Formalismus. Mitarbeiter der DESY Theoriegruppe haben im Berichtsjahr große Fortschritte bei der Lösungen der sehr komplexen Feldgleichungen gemacht. Insbesondere wurden zahlreiche exakte Lösungen der Stringfeldtheorie für offene Strings mit überwiegend analytischen Methoden konstruiert [DESY-07-007, DESY-07-047, DESY-07-056, DESY-07-110, DESY-07-130].

## Mathematische Physik

In der Mathematischen Physik gab es die folgenden Entwicklungen:

- Gruppentheoretische Quantisierung des topologisch nicht-trivialen Phasenraumes  $S^1 \times \mathbb{R}^+$ . Dieser entspricht dem kanonischen Paar *Winkel und (positive) Wirkungsvariable*, z. B. beim Harmonischen Oszillator, für den man so eine neue reichhaltigere Quantenmechanik bekommt, die interessante experimentelle Konsequenzen hat (DESY 06-209; Ann. Physik (Leipzig) **16** (2007) 439–528).
- Mannigfaltigkeiten mit Flächenmaß: Aus der Betrachtung der Elektrodynamik im geometrisch-optischen Grenzfall wurde gezeigt, dass die Pro-

pagation von Licht entlang von Nullgeodäten bezüglich einer Finslernorm, die über den Fresnel-Tensor aus dem Flächenmaß abgeleitet ist, stattfindet. Dieselbe Finslernorm beschreibt auch die effektive Bewegung von Punktteilchen; dieses Ergebnis wurde aus einer isotropischen Mittelung über ein Stringfluid auf dem verallgemeinerten Hintergrund hergeleitet.

- Unendlich-dimensionale Mannigfaltigkeiten: Wir haben uns mit der Konstruktion einer *Quanten-Mannigfaltigkeit* beschäftigt, die lokal homöomorph zu einem Schwartzraum ist. Durch Einführung einer geeigneten Topologie auf dieser Mannigfaltigkeit ist es gelungen, eine Abbildung auf eine klassische endlich-dimensionale Mannigfaltigkeit zu konstruieren, deren Karten durch die Ortserwartungswerte auf dem Schwartzraum gegeben sind.
- Die Rolle der Renormierungsgruppe in der perturbativen algebraischen Quantenfeldtheorie wurde analysiert, insbesondere im Hinblick auf Theorien über gekrümmten Raumzeiten.
- Es wurde untersucht, in welchem Sinn die sogenannten Polymerdarstellungen der Loopquantengravitation Zustände in Schrödingerdarstellungen approximieren können.
- Quantenfeldtheorien auf nicht kommutativen Raumzeiten wurden studiert. Hierbei konzentrierten sich die Untersuchungen auf die Auswirkungen der Nichtkommutativität auf die Dispersionsrelationen.

## Internationale Zusammenarbeit und Drittmittel-Projekte

Die Arbeit der DESY Theoriegruppe wurde im Bereichszeitraum durch zahlreiche Förderungen der Helmholtz Gesellschaft unterstützt. Dazu gehörten neben einer Helmholtz Allianz und zwei virtuellen Instituten auch eine Reihe von Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppen, die vorwiegend von Mitarbeitern aus der DESY Theorie geleitet wurden.

- Helmholtz Allianz: *Physik an der Teraskala*
- 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:

1. Stipendium (MEXT-CT-2006-042695) der EU-Kommission zum Aufbau eines Marie-Curie-

Exzellenzteams *Non-linear Sigma Models in String Theory*

2. Marie Curie Excellence Chair für Theoretische Physik, Prof. Dr. Lev Lipatov
3. Helmholtz-Allianz (HA 101) *Physik an der Teraskala*
4. BMBF-Projektförderung (05 HT6GUA): *Theoretische Interpretation von Hochenergieexperimenten mit HERA, LEP und Tevatron sowie Vorhersagen für LHC und TESLA,*
5. DAAD-Programm *PROCOPE* mit École Polytechnique, Palaiseau, Frankreich,
6. Graduiertenkolleg der DFG (GRK 602): *Zukünftige Entwicklungen in der Teilchenphysik,*
7. DFG-Schwerpunktprogramm (SPP 1096) *Stringtheorie,*

sowie zwei Forschungspreise und eine Reihe von DFG-Sachbeihilfen am II. Institut für Theoretische Physik. Die Hamburger Theoriegruppen sind ferner in mehrere Netzwerke der Europäischen Gemeinschaft eingebunden. Eine Reihe von Gastwissenschaftlern wurden durch verschiedene Drittmittel und Stipendien unterstützt. Deren Forschungsaufenthalte bei der Hamburger DESY-Theorie trugen maßgeblich zur stimulierenden Forschungsatmosphäre in der Theoriegruppe bei.

## Mitarbeit bei der Organisation von Konferenzen

- DESY Theory workshop 2007 on *Quantum chromodynamics: String theory meets collider physics*, DESY, Hamburg
- XV International Workshop on *Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2007)*, München
- *Linear Collider Workshop 2007 (LCWS2007, ILC2007)*, Hamburg

- 5th International Workshop on *Heavy Quarkonia 2007*, Hamburg
- ESI workshop on *Mathematical and Physical Aspects of Perturbative Approaches to Quantum Field Theory*, Wien, Österreich
- ZMP Workshop on the *Geometric Langlands program*, DESY, Hamburg
- String Steilkurs Part II: *Advanced Topics in String Theory*, DESY, Hamburg
- 12th International Conference on *Elastic and Diffractive Scattering: Forward Physics and QCD*, DESY, Hamburg
- *Symposium on Particle Cosmology*, VIPAC meeting, DESY, Hamburg
- *Flavor Physics and CP Violation*, FPCP 2007 Lake Bled, Slovenien
- *HERA and the LHC*, CERN, Genf
- The 15th International Conference on *Supersymmetry and the Unification of Fundamental Interactions*, SUSY07, Karlsruhe

## Aktivitäten in Zeuthen

### Physik an Beschleunigern

In der störungstheoretischen Quantenfeldtheorie standen Untersuchungen für Streuprozesse bei HERA, an  $e^+e^-$ -Collidern und am *Large Hadron Collider* (LHC) im Vordergrund, insbesondere die Berechnung von Quantenkorrekturen auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung (QCD) und der Quantenelektrodynamik (QED).

Für die Hadro-Produktion von schweren Quarks konnten zum ersten Mal die Korrekturen zu nächst-nächst-führender Ordnung, d. h. die Feynman-Diagramme zu zwei Schleifen, im Grenzfall kleiner Quarkmassen exakt berechnet werden [arXiv:0705.1975, 0707.4139]. Des weiteren konnte die totale Zerfallsbreite des Higgs-

Bosons zur dritten Ordnung in der starken Kopplungskonstante bestimmt werden zusammen mit der zeitartigen Gluon-Splittingfunktion, deren Kenntnis eine präzisere Bestimmung von Fragmentationsprozessen erlaubt [arXiv:0709.3899].

Beiträge zu den Korrekturen durch schwere Quark-Beiträge zur tief-inelastischen Streuung im unpolarisierten und polarisierten Fall wurden zu  $O(\alpha^2)$  und  $O(\alpha^3)$  berechnet [hep-ph/0702265, 0703285, arXiv:0706.2738, 0707.4659, 0710.3348]. Für Streuprozesse mit tief-inelastischer Kinematik und dem Austausch von geladenen Strömen konnten Mellin-Momente der Koeffizientenfunktionen zur dritten Ordnung berechnet werden [arXiv:0704.1740]. Mit diesen Ergebnissen wurden die QCD-Vorhersagen für die Paschos-Wolfenstein Relation verbessert [arXiv:0708.3731]. Weitere Arbeiten betrafen Target-Massen-Korrekturen im diffraktiven Fall [arXiv:0706.2478] sowie Parton-Verteilungsfunktionen und  $\Lambda_{\text{QCD}}$  [arXiv:0706.2430,

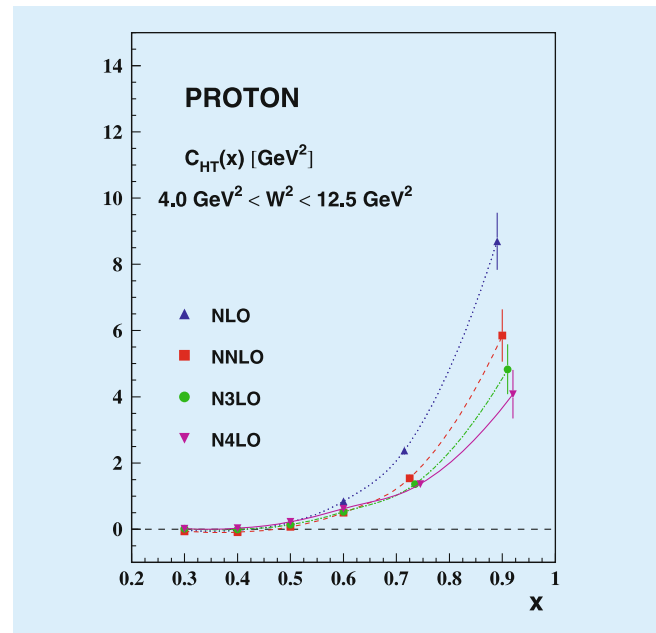


Abbildung 94: Vergleich der Beiträge höheren Twists  $C_{HT}(x)/Q^2$  zur Strukturfunktion  $F_2^{ep}(x, Q^2)$  im Bereich großer Werte von  $x$  von NLO bis  $N^3LO$  für die tief-inelastischen Welt-Daten. Die  $O(\alpha_s^4)$ -Korrektur ( $N^4LO$ ) zum non-singlet-Wilson-Koeffizienten ist in den führenden Beiträgen berücksichtigt.

0708.1474, 0711.1721]. Korrekturen höheren twists zur Strukturfunktion  $F_2(x, Q^2)$  wurden im Rahmen einer 4-Schleifen Analyse im Bereich großer Werte von Bjorken  $x$  extrahiert [DESY 07-227]. Der Effekt zeigt eine starke Abhängigkeit von der Störungsordnung, siehe Abbildung 94. Mathematische Eigenschaften von Wilson-Koeffizienten und anomalen Dimensionen in höherer Ordnung wurden in [arXiv:0706.2426] und Lösungen von Dyson-Schwinger-Gleichungen in [hep-th/0612180] untersucht. Universelle QED-Korrekturen durch unpolarisierte Streuung von geladenen Fermionen wurden bis zu  $O((\alpha L)^5)$  für allgemeine Streuprozesse berechnet [hep-ph:0701019].

Die Bhabha-Streuung ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ) ist ein wichtiger Referenzprozess an  $e^+e^-$ -Collidern, besonders auch zur hochpräzisen Luminositätsbestimmung. Die Berechnung der virtuellen Zweischleifenkorrekturen dazu wurde mit der Vorhersage der Beiträge schwerer Leptonen beliebiger Masse und von Hadronen abgeschlossen [arXiv:0704.2400, 0710.5111, 0711.3847]. Abbildung 95 zeigt die numerischen Resultate für Experimente am ILC.

Zur weiteren Automatisierung der Auswertung von Mellin-Barnes-Darstellungen für Feynmandiagramme wurde das Mathematica-Paket AMBRE entwickelt und als *Public Domain Software* veröffentlicht [arXiv:0704.2423]. Die MB-Methode wurde für die

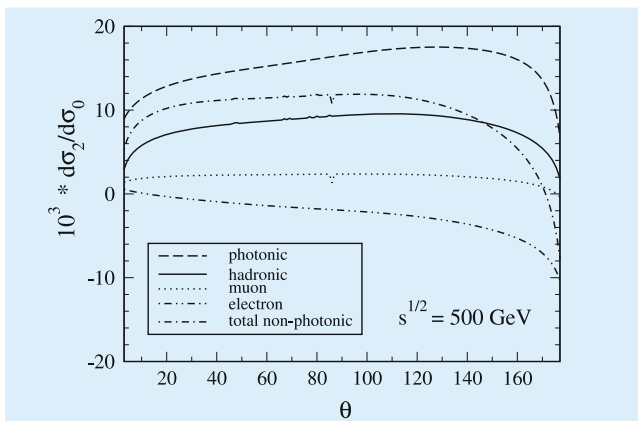


Abbildung 95: Hadronische Zweischleifen-Korrekturen von massiven Fermion-Schleifen zur Bhabha-Streuung am ILC als Funktion des Streuwinkels.

Beschreibung von zugleich auftretenden virtuellen und reellen Infrarot-Divergenzen ausgearbeitet [arXiv:0707.3567, 0710.5100, 0712.2969].

## Nichtperturbative Quantenfeldtheorien

Die Berechnung nichtperturbativer Größen in der QCD mit schweren Quarks ist von Bedeutung für die Analyse der Präzisionsexperimente bei Babar und Belle, aber auch von zukünftigen Experimenten in der B-Physik. Neue Strategien wurden entwickelt, um hier zu Genauigkeiten zu gelangen, die es erlauben, auch kleine Effekte jenseits des Standardmodells zu isolieren [arXiv:0710.2201, 0710.2229, 0710.1553, 0705.1809]. Koordiniert mit anderen europäischen Gruppen, sollen diese Strategien in der QCD mit dynamischen Quarks angewendet werden; siehe auch die Webseite <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CLS/WebHome>. Detaillierte Vorarbeiten werden hierfür geleistet ([arXiv:0710.1263, arXiv:0710.1188]).

Eine weitere Forschungsaktivität im Bereich der Gitterfeldtheorie sind Simulationen mit dynamischen Quarks in der Formulierung der Gitter-QCD mit chiral rotiertem Massenterm. Dieses Projekt ist Teil einer breit angelegten *European Twisted Mass Collaboration* (ETMC). Bisher konnte die ETMC eine sehr präzise Bestimmung der Niederenergiekonstanten der chiralen Störungstheorie vornehmen [hep-lat/0701012]. Darüberhinaus wird das komplette Oktett- und Dekuplett-Spektrum berechnet [arXiv:0710.1173]. Weitere Untersuchungen betreffen die Momente von Parton-Verteilungsfunktionen [arXiv:0710.1580], die nicht-perturbative Bestimmung der Renormierungskonstanten [arXiv:0710.0975], die Berechnung der leichten Quarkmassen (von Up-, Down- und Strange-Quarks) [arXiv:0710.0329, arXiv:0709.4574] sowie der Charm-Quarkmassen [arXiv:0710.1414], Meson-Formfaktoren [arXiv:0710.0097] und die Bestimmung der Massen neutraler Mesonen [arXiv:0709.4564]. Weitere Arbeiten von mehr technischer Natur sind in den Referenzen [Cichy:2007vk, arXiv:0711.1871, arXiv:0711.1871] zu

finden. Erwähnt sei noch eine Studie des Phasendiagramms der QCD bei nicht-verschwindender Temperatur [arXiv:0710.0569].

## Konferenzen

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

- CERN/DESY workshop on *HERA and the LHC* 12–16 March 2007, DESY, Hamburg
- International DESY School on *Computer Algebra and Particle Physics 2007* (CAPP 2007) (Local Organizing Committee and Chair) 25–30 March 2007, Zeuthen, Germany.
- International Summer School on *Lattice QCD and its applications* (Co-Chair) Seattle, USA, 1.1.2007–31.8.2007, Seattle, USA

## Internationale Zusammenarbeit, Drittmittel-Projekte und Lehrtätigkeit

Im Berichtszeitraum wurde im 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 mitgearbeitet. Antragsteller sind hier J. Blümlein, K. Jansen, S. Moch, R. Sommer und T. Riemann.

Der Bereich Theorie ist Mit Antragsteller bei zwei TMR-Netzwerken zur Nachwuchsausbildung der Eu-

ropäischen 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).

Wir sind an zwei Einzelprojekten der DFG als Leiter beteiligt: *Higgsmodelle auf dem Gitter* (mit der HU Berlin) und *QCD mit chiral rotiertem Massenterm* (mit der Universität Münster).

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.

Es besteht eine enge Zusammenarbeit der Theoriegruppe mit den Universitäten Aachen, HU Berlin, Bielefeld, USB Caracas/Y, Cottbus, Durham/UK, Glasgow/UK, Grenoble/F, Groningen/NL, Katowice/PL, Leipzig, Liverpool/UK, Madrid/E, Mainz, Milton Keynes/UK, Münster, Rom II, III/I, Nikosia/Cy, Poznan/PL, Paris Süd/F, Valencia/E, Würzburg, Zürich/CH, und den Forschungszentren ECT\* Trento, Harish Chandra Research Institute Allahabad/IN, NIKHEF, Amsterdam/NL, CERN/CH, IHEP Serpukhov/RU, RIKEN, Tokyo/J, und RISC, Linz/A.

An der Universität Potsdam wurden die Vorlesungen *Quantenfeldtheorie* und *Standardmodell der Elementarteilchen-Theorie* gehalten. An der Humboldt-Universität Berlin wurden Vorlesungen über *Physik an Hadron-Beschleunigern* und *Physik am LHC* gehalten, sowie die Vorlesung *Spezielle Kapitel der Quantenfeldtheorie* an der Universität Dortmund.

Mehrere Diplom- und Doktorarbeiten wurden betreut.