

Theoretische Physik

Sprecher: P. M. Zerwas

Das wissenschaftliche Programm der DESY Theorie-Gruppe und des II. Instituts für Theoretische Physik hatte folgende Schwerpunkte:

- Quantenchromodynamik bei HERA und in Hadron-Hadron-Prozessen,
- Flavour-Physik bei B-Mesonen,
- Physik bei TESLA,
- Neutrino-Physik und Kosmologie,
- Gittereichtheorien,
- Quantengravitation.

Eine besondere Rolle spielte dabei die Analyse des Physik-Potentials bei TESLA im Zusammenhang mit dem „Technical Design Report“ für die Maschine. Ein übergreifendes Thema der HERA-Physik, B-Mesonen, e^+e^- -Physik, Kosmologie sowie Gittereichtheorien bildeten verschiedene Aspekte supersymmetrischer Theorien.

Quantenchromodynamik

Aus theoretischer Sicht besteht eine der wichtigsten Aufgaben von HERA und anderen Teilchenbeschleunigern darin, verschiedene Aspekte der Quantenchromodynamik (QCD) quantitativ zu testen und eine genaue Bestimmung ihrer Parameter zu ermöglichen. Die QCD ist eine Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung, die auf der nichtabelschen Eichgruppe $SU(3)$ basiert und einen Bestandteil des heute allgemein anerkannten Standardmodells der Elementarteilchen bildet. Die QCD enthält als Materieteilchen sechs Arten von Quarks und als Austauschteilchen elektrisch neutrale Gluonen. Diese so genannten Partonen tragen Farbladungen, welche in beobachtbaren Bindungszuständen (Hadronen) stets neutralisiert sein müssen (Farbeinschlussprinzip). Die Kopplungsstärke der star-

ken Wechselwirkung, $\alpha_s(\mu)$, hängt logarithmisch von der Energieskala μ des betrachteten Prozesses ab. Für hinreichend große Werte von μ ist $\alpha_s(\mu)$ klein genug für eine Störungsentwicklung, während im komplementären μ -Bereich nicht-störungstheoretische Methoden Anwendung finden.

Schwere Quarks

Die nichtrelativistische QCD (NRQCD) sagt die Existenz so genannter Farboktettprozesse in der Natur vorher, das heißt schwere Quarkonia können auch aus Quark-Antiquark-Paaren entstehen, wenn deren Farbladungen nicht neutralisiert sind. Die im Rahmen dieser Theorie vorhergesagten Wirkungsquerschnitte für die inklusive Charmonium-Erzeugung in tiefunelastischer ep -Streuung [DESY 01-196] bzw. in quasireeller $\gamma\gamma$ -Streuung [DESY 01-202] stimmen gut mit entsprechenden Daten der H1-Kollaboration bei HERA bzw. der DELPHI-Kollaboration bei LEP2 überein, nachdem die relevanten nicht-störungstheoretischen Matrixelemente aus Tevatron-Daten der inklusiven Charmonium-Erzeugung bestimmt wurden. Im Rahmen dieser Theorie wurde auch die assoziierte Erzeugung von Charmonium mit zwei Hadronenjets in direkter Photoproduktion bei TESLA untersucht [DESY 01-039].

Der führende massenunterdrückte Zwei-Schleifen-Beitrag der Form $\alpha_s^3/m_q r^2$ zum Potential eines schweren Quark-Antiquark-Systems wurde mit Hilfe der Methode der Schwellenentwicklung im Rahmen der NRQCD analytisch berechnet. Dieser Beitrag rührt von der nichtabelschen Natur der QCD her und besitzt kein Gegenstück in der Quantenelektrodynamik. Seine quantitativen Auswirkungen auf die Top-Quark-Spektroskopie können mit TESLA getestet werden. Ferner wurde ein früheres Ergebnis für die Zwei-Schleifen-Korrektur der Ordnung α_s^2 zum statischen Potential bestätigt [DESY 01-075].

Für die Top-Quark-Paarproduktion in Hadron-Kollisionen $p\bar{p}, pp \rightarrow t\bar{t} + X \rightarrow \ell^+ \ell'^- + X$ wurde die doppelt-differentielle Winkelverteilung der Leptonen ℓ, ℓ' in nächstführender Ordnung (NLO) der QCD berechnet [DESY 01-040, 085]. Diese Winkelverteilung spiegelt die Korrelationen zwischen den Spins der Top-Quarks und -Antiquarks wider. Ihr Studium erlaubt somit einen detaillierten Einblick in die Wechselwirkungen, die Erzeugung und Zerfall der Top-Quarks bestimmen.

Strukturfunktionen

Für HERA wurde die Photoproduktion von führenden Neutronen in höherer Ordnung der QCD Störungstheorie berechnet [DESY 01-026]. Da in diesem Prozess effektiv Photonen an geladenen Pionen gestreut werden, erlauben Vergleiche dieser präzisen neuen Rechnung mit HERA-Messungen erstmals eine genaue Bestimmung der Gluon- und Seequarkdichten im Pion [hep-ph/0107011]. Die Pion-Struktur ist sowohl von theoretischer als auch von praktischer Bedeutung: Sie erlaubt die Überprüfung der chiralen und Isospin-Symmetrie und wird als Randbedingung für die Photon-Struktur benötigt. In älteren „Fixed-Target“-Experimenten konnte sie leider nur unzureichend bestimmt werden. Insbesondere die Gluondichte wurde bisher überschätzt.

Die HERA-Daten zur Proton-Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ werden im Bereich kleiner Werte von x und Q^2 erfolgreich durch ein Saturierungsmodell beschrieben. Ein wesentlicher Aspekt dieses Modells, die Unitarisierung, wurde mit Hilfe der nichtlinearen Kovchegov-Gleichung untersucht [DESY 01-172]. Auch auf dem Gebiet der polarisierten Elektron-Proton-Streuung bei kleinen Werten von x wurde ein wesentlicher Fortschritt durch die Berechnung beider Strukturfunktionen $g_1(x, Q^2)$ und $g_2(x, Q^2)$ erzielt [DESY 01-198].

Auf dem Gebiet der BFKL-Physik lag der Forschungsschwerpunkt auf der Berechnung der Korrekturen höherer Ordnung zum so genannten Impakt-Faktor des Photons. Insbesondere wurden die reellen Strahlungskorrekturen vollständig berechnet, und es wurde gezeigt, dass das Bild von der Wellenfunktion des Photons seine Richtigkeit behält [DESY 01-102]. Es wurde auch die Berechnung der Korrekturen zur Vorwärtsjet-Erzeugung bei HERA in Angriff genommen. Erste Er-

gebnisse für den Quark-initiierten Jetvertex wurden veröffentlicht [DESY 01-221]. Diese beiden Ergebnisse werden genaue Tests der BFKL-Hypothese bei HERA, Tevatron, LHC und TESLA gestatten.

Kürzlich ist neues Interesse am Odderon, dem Partner des Pomerons mit den Quantenzahlen $C = P = -1$, aufgekommen. Die diffraktive η_c -Erzeugung ist hierbei ein besonders interessanter Prozess. Für diesen wurde eine Vorhersage auf der Grundlage der störungstheoretischen Odderon-Lösung gemacht [DESY 01-020].

QCD-Modelle

Ein populäres Modell zur Beschreibung des nicht-störungstheoretischen Niederenergie-Anteils von Prozessen der starken Wechselwirkung besteht darin, $\alpha_s(\mu)$ in das hadronische Regime hinein zu extrapolieren. Wenn diese kühne Idee richtig ist, dann besitzt das Partonbild einen erstaunlich weiten Geltungsbereich in Bezug auf vorhandene Daten. Andererseits könnte die Messung eines Mittelwerts von $\alpha_s(\mu)$ bei niedrigen Energien einen ersten Schritt hin zum vollständigen Verständnis der QCD bedeuten. HERA eignet sich hervorragend zur Überprüfung dieser Idee. Während der letzten fünf Jahre wurden auf dem Parton-Niveau so genannte „Event-Shape“-Observable berechnet, die eine pauschale Beschreibung der beobachteten Hadronjets liefern. Zur Berücksichtigung der Hadronisierung wurde das oben genannte Modell mit universellem $\alpha_s(\mu)$ verwendet. Auf diese Weise wurden verschiedene Event-Shape-Observable eingehend untersucht. In den meisten Fällen konnte eine hervorragende Beschreibung der experimentellen Daten erzielt werden [DESY 01-160]. Darüber hinaus wurden neue Event-Shape-Observable konstruiert, welche die Abstrahlung von zwei Hadronjets einbeziehen [hep-ph/0110384]. Entsprechende Messungen bei HERA werden mit Spannung erwartet.

Ein verbessertes Verständnis der nicht-störungstheoretischen QCD wurde auch durch die kürzlich entwickelten Modelle der weichen Farbwechselwirkung erlangt. Diese beruhen auf einer Variation der Farbstringfeldtopologien und liefern eine einheitliche Beschreibung verschiedener Endzustände in hochenergetischen Wechselwirkungen. Die spektakulären HERA-Ereignisse mit einer Rapiditätslücke können auf einfache Weise beschrieben werden, indem man in den

Standard-Ereignisgenerator LEPTO ein entsprechendes einparametrisches Modell einbaut. Die Anwendung des gleichen Modells mit dem PYTHIA Generator auf $p\bar{p}$ -Wechselwirkungen liefert eine gute Beschreibung der Tevatron-Daten zur Erzeugung von W-Bosonen, Bottom-Quarks und Hadronjets in Ereignissen mit einer oder zwei Rapiditätslücken [DESY 01-076]. Ferner fand man, dass diese Modelle auch Fixed-Target- und Collider-Daten der Charmonium-Erzeugung beschreiben [hep-ph/0111379]. Diese verschiedenartigen Effekte der nicht-störungstheoretischen QCD besitzen daher möglicherweise einen gemeinsamen Ursprung.

Solche Modelle sind jedoch nicht in der Lage, die beobachteten Rapiditätslücken zwischen zwei Hadronjets mit großen Transversalimpulsen zu erklären. Andererseits kann der große Impulstransfer über die Rapiditätslücke beschrieben werden durch den Austausch eines gluonischen Farbsingulett-Systems im Rahmen des BFKL-Modells, welches auf der störungstheoretischen QCD beruht. Um solche Daten, etwa vom Tevatron, richtig zu beschreiben, müssen auch nicht-führende Korrekturen und das Laufen von $\alpha_s(\mu)$ berücksichtigt werden [hep-ph/0111090]. Eine entsprechende Untersuchung von Rapiditätslücken zwischen Hadronjets bei HERA wird durchgeführt.

Instanton-induzierte Prozesse

Vielversprechende Ansätze im Hinblick auf ein Verständnis nicht-störungstheoretischer Phänomene in der QCD beruhen auf einem vermutlich engen Zusammenhang zwischen der Struktur des euklidischen QCD-Vakuums und spezifischen Streuprozessen. Ein wichtiges Beispiel sind Instantonen als nicht-störungstheoretische, topologisch nichttriviale Fluktuationen der Gluonfelder, mit einer mittleren Ausdehnung von etwa 0.5 fm.

Kleine Instantonen induzieren charakteristische, harte Streuprozesse, die in der gewöhnlichen störungstheoretischen QCD verboten sind, jedoch im Rahmen der Instanton-Störungstheorie berechnet werden konnten [DESY 01-125]. Dabei wurde erkannt, dass die tiefelastische Streuung bei HERA eine einzigartige Möglichkeit bietet, diese grundlegenden QCD-Prozesse erstmalig nachzuweisen. In der Tat fand eine Suche der H1-Kollaboration einen allerdings noch nicht schlüs-

sigen Überschuss in den Daten, ermutigend nahe an den theoretischen Voraussagen. In engem Dialog mit H1-Experimentalphysikern werden verbesserte Suchstrategien erarbeitet [DESY 00-172].

Zwei neuere Projekte betreffen die Rolle größerer Instantonen sowohl im QCD-Vakuum als auch in hochenergetischen diffraktiven Streuprozessen. In diesem Bereich größerer Abstände sind die Hinweise von Gittersimulationen unverzichtbar. So zeigen Gitterdaten für die Verteilung der Instantongröße ρ eine praktisch perfekte Inversionssymmetrie unter $\rho \rightarrow 1/\rho$. Sie wird als Relikt der wohlbekannteren konformen Invarianz des gesamten Instanton-Sektors auf dem klassischen Niveau interpretiert [DESY 01-125]. In der Tat wird durch eine konforme Koordinateninversion $x_\mu \rightarrow x_\mu/x^2$ das klassische Eichfeld eines Instantons der Größe ρ in das eines (Anti-)Instantons der Größe $\propto 1/\rho$ transformiert. Da durch eine konforme Inversion die Physik bei kleinen Abständen zu der bei großen Abständen in Beziehung gesetzt wird, sind mögliche Konsequenzen für die nicht-störungstheoretische QCD im allgemeinen von großem Interesse.

In einem weiteren Projekt wurde der bereits bekannte Ein-Instanton-Beitrag zur γ^*N -Streuung in das bei HERA populäre Farbdipolbild übersetzt. Neben der transversalen Ausdehnung $|\vec{r}|$ des am Nukleon streuenden $q\bar{q}$ -Dipols kommt nun eine weitere Skala ins Spiel, die effektive Instantongröße $\rho_{\text{eff}}(Q)$. Das Ergebnis ist ein Verlust der Farbtransparenz und ein konstanter Dipol-Wirkungsquerschnitt schon bei kleinen Werten von \vec{r}^2 [DESY 01-125].

B-Mesonen

Das Studium CP-verletzender Effekte in B-Meson-Zerfällen erlaubt eine strenge Überprüfung der Beschreibung der CP-Verletzung durch das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung und ist eines der gegenwärtig spannendsten Gebiete der Teilchenphysik. Eine Schlüsselrolle kommt hierbei dem Unitaritätsdreieck der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix zu, welches aus der Unitarität dieser Matrix folgt; die „on-mass-shell“ Renormierung der CKM Matrix wurde kürzlich diskutiert [DESY 01-071]. Das zentrale Ziel der kommenden Jahre ist die Überbestimmung dieses Dreiecks durch die unabhängige

Messung seiner Seiten und Winkel α , β und γ , wobei die Hoffnung besteht, durch den Einfluss „neuer“ Physik widersprüchliche Resultate zu erhalten.

Im Sommer des Jahres 2001 konnte an den B-Fabriken am SLAC und KEK erstmals die CP-Verletzung im B-System mit Hilfe des „goldenen“ Zerfalls $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ nachgewiesen werden, dessen mischungs-induzierte CP-Asymmetrie $a_{\psi K_S}$ eine theoretisch saubere Bestimmung der Größe $\sin 2\beta$ erlaubt. Für eine systematische, modellunabhängige Analyse möglicher Effekte neuer Physik ist es wichtig, auch die geladenen Zerfälle $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ zu messen. Es lassen sich dann geeignete Observable einführen, die nicht nur Hinweise auf neue Physik, sondern auch Einblicke in die Hadrodynamik der Zerfälle $B \rightarrow J/\psi K$ geben können [DESY 01-006]. Analoge Studien können auch für das System $B \rightarrow \phi K$ durchgeführt werden, das von virtuellen Schleifenbeiträgen beherrscht wird und daher besonders sensitiv auf den Einfluss neuer Physik reagiert [DESY 01-030]. So kann man beispielsweise durch komplexe Flavour-Kopplungen im Squark-Sektor supersymmetrischer Theorien Abweichungen der mischungsinduzierten CP-Asymmetrie im Zerfall $B^0 \rightarrow \phi K_S$ von der Standardmodell-Erwartung von bis zu O(20%) erhalten [DESY 01-128].

Darüber hinaus gibt es vielfältige andere mögliche Signaturen supersymmetrischer Modelle in B-Zerfällen [DESY 01-224]. Ein besonders wichtiges Element in der Überprüfung der Standardmodell-Beschreibung der CP-Verletzung ist auch die Bestimmung des Winkels γ , für die die Zerfälle $B \rightarrow \pi K$ und das $B_d^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$ System sehr vielversprechend sind [DESY 01-162].

Eine Brücke zwischen der CP-Verletzung in den B- und K-Systemen wird durch die seltenen Zerfälle $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ und $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ hergestellt, deren Verzweungsverhältnisse in Modellen mit „minimaler Flavour-Verletzung“ (MFV) bemerkenswerte Korrelationen mit $a_{\psi K_S}$ zeigen [DESY 01-054]. Durch Einführung zusätzlicher flavour-ändernder Strukturen, deren Ursprung jenseits der CKM Matrix liegt, lassen sich interessante Erweiterungen MFV-supersymmetrischer Modelle konstruieren [DESY 01-059].

Neben CP-Asymmetrien in B-Zerfällen, wie zum Beispiel $a_{\psi K_S}$, stellen radiative $b \rightarrow d\gamma$ Übergänge sehr sensitive Sonden für solch neue flavour-ändernde

Kopplungen dar, insbesondere durch das Verhältnis $BR(B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma)/BR(B^0 \rightarrow K^{*\gamma})$, das isospinverletzende Verhältnis $BR(B^\pm \rightarrow \rho^\pm \gamma)/BR(B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma)$ und die CP-Asymmetrie in $B^\pm \rightarrow \rho^\pm \gamma$ Zerfällen. In der theoretischen Beschreibung exklusiver Übergänge $B \rightarrow K^* \gamma$ und $B \rightarrow \rho \gamma$ konnten kürzlich wichtige Fortschritte erzielt werden, die eine Berechnung der entsprechenden Verzweungsverhältnisse in nächstführender Ordnung in der starken Kopplung α_s und der Quarkmasse erlauben [DESY 01-068]. Darüber hinaus wurden die Zerfälle $B \rightarrow K^{**} \gamma$ im Rahmen eines QCD-Summenregel-Formalismus auf dem Lichtkegel untersucht [DESY 01-138].

Eine herausragende Rolle für die Suche nach neuer Physik spielen die Zerfälle $B \rightarrow (X_s, K, K^*) \ell^+ \ell^-$, deren Verzweungsverhältnisse genauer berechnet wurden. Unter Verwendung dieser Resultate und der gegenwärtig verfügbaren Messungen der $B \rightarrow X_s \gamma$ und $B \rightarrow K \ell^+ \ell^-$ Verzweungsverhältnisse und der oberen Grenzen für die Zerfälle $B \rightarrow (X_s, K^*) \ell^+ \ell^-$ konnten Einschränkungen an die Wilson-Koeffizienten der entsprechenden effektiven Niederenergie-Theorie gewonnen werden, die mit den Vorhersagen des Standardmodells und einigen supersymmetrischen Szenarien konsistent sind [DESY 01-217].

Physik bei TESLA

Das Physik-Potential von TESLA ist für den Higgs-Mechanismus und die elektroschwache Wechselwirkung sowie für physikalische Bereiche jenseits des Standardmodells, insbesondere die Supersymmetrie, untersucht worden. Diese Analysen bildeten die theoretische Grundlage für die entsprechenden Kapitel im Technical Design Report von TESLA [DESY 01-011], den die DESY Theorie-Gruppe maßgebend mitformuliert hat. Diese Studien bildeten auch eine wesentliche Grundlage für die Diskussionen und für die Ergebnisse, die auf dem amerikanischen Workshop „Snowmass 2001 – The Future of Particle Physics“ erzielt worden waren. Sie führten zum Konsens darüber, dass es die vordringlichste Aufgabe der Hochenergiephysik sei, den Bau eines e^+e^- -Linear-Colliders im TeV-Energiebereich zu realisieren.

Die Entdeckung neuer Phänomene wie auch Präzisionsmessungen im Standardmodell und im Bereich

jenseits des Modells sind der Kernpunkt des Physik-Programmes an einem Linear-Collider.

Strahl-Polarisation

Eine hohe Polarisation des Elektronenstrahls reicht im allgemeinen aus, die Grundelemente des Physik-Programms bei TESLA zu überdecken. Jedoch verbessert die simultane Polarisation des Positronenstrahls nicht nur die Unterdrückung von Untergrundprozessen, sondern sie ist auch für die Analyse einiger bedeutender neuer physikalischer Phänomene und für einige Präzisionsmessungen von Standardmodell-Prozessen unabdingbar [DESY 00-178]. Im TESLA-Design sollen ein Elektron-Polarisationsgrad von 80% und ein Positron-Polarisationsgrad von bis zu 60% realisiert werden.

W-Boson-Physik

Die W-Paarzeugung an e^+e^- -Beschleunigern liefert einen wichtigen Test des Standardmodells der elektroschwachen Wechselwirkung. Abbildung 59 stellt die Messwerte von LEP für den totalen Streuquerschnitt σ^{WW} den Präzisionsrechnungen der Monte Carlo-Eventgeneratoren RACONWW und YFSWW gegenüber.

Die Messgenauigkeit für den Wirkungsquerschnitt von etwa 1%, die an zukünftigen Beschleunigern wie TESLA noch übertroffen werden kann, erfordert eine sorgfältige Kontrolle von Effekten höherer Ordnung der Störungstheorie (Strahlungskorrekturen) sowie die Einbeziehung des W-Zerfalls [DESY 01-003].

Die WW-Produktion erlaubt ferner eine genaue Messung der W-Masse sowie eine direkte Untersuchung der Eichboson-Selbstwechselwirkung. Die theoretische Unsicherheit in der Einschränkung der 3-Eichboson-Kopplungen bei LEP wurde sorgfältig ausgearbeitet [DESY 01-184] und die Erweiterung von RACONWW zur Analyse von anomalen 4-Eichboson-Kopplungen in $WW\gamma$ -Produktion beschrieben [DESY 01-042].

An Hadron-Beschleunigern wird die W-Masse über die W-Produktion in der Quark-Antiquark Annihilation bestimmt. Der Bericht [DESY 01-121] enthält die bislang

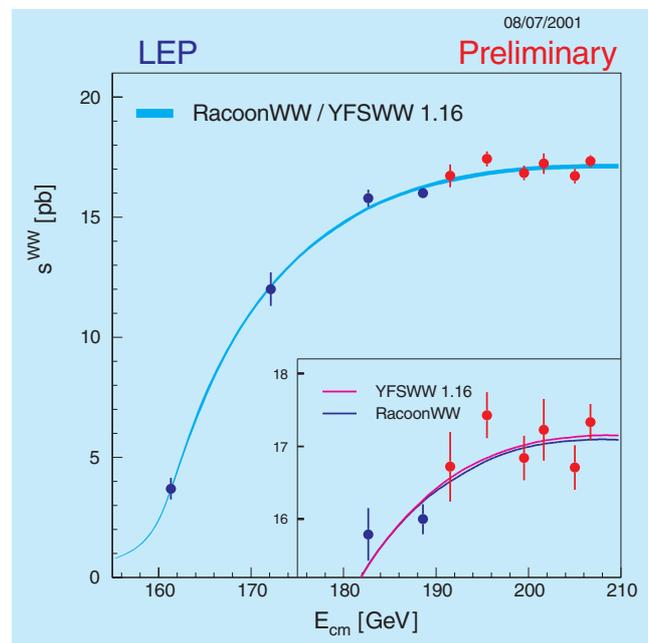


Abbildung 59: W-Paarproduktion in der e^+e^- -Annihilation.

umfassendste Berechnung der relevanten Strahlungskorrekturen, die auch in der Suche nach neuer Physik über hochenergetische W-Bosonen am LHC wichtig sind.

Higgs-Physik

Nach der LEP-Ära in der Hochenergie-Physik konzentrieren sich nun die Vorbereitungen für die Suche nach Higgs-Teilchen auf die Hadronen-Maschinen Tevatron am Fermilab und LHC am CERN, sowie auf zukünftige Elektron-Positron Linear-Collider [DESY 01-203].

Die Suche nach Higgs-Bosonen am Tevatron ist außerordentlich schwierig, da die Signale aus einer großen Zahl von Untergrund-Ereignissen isoliert werden müssen. Einer dieser Kanäle ist die Abstrahlung von Higgs-Bosonen von schweren Top- und Bottom-Quarks, die beispielsweise in der Gluon-Fusion bei Proton-Proton Stößen erzeugt werden. Zwar ist die Ereignisrate in diesem Kanal gering, doch sind die Signaturen sehr klar. Theoretisch konzeptionell befriedigende Vorhersagen mit experimentell wünschenswerter Genauigkeit sind für diesen Kanal in [DESY 01-077] erreicht worden. Rechnungen höherer Ordnung in der QCD haben zu

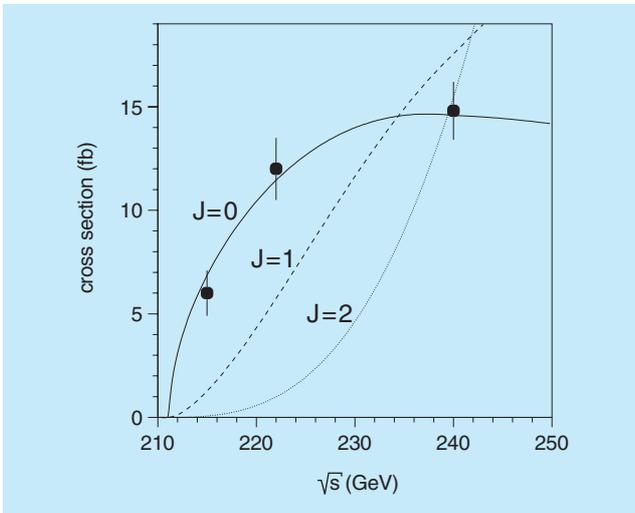


Abbildung 60: Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes in Higgs-Strahlung vom Spin des Higgs-Bosons.

einer beeindruckenden Stabilisierung der Analyse geführt, so dass die Suche nach Higgs-Bosonen in diesem Kanal theoretisch gut fundiert ist.

Wegen hoher Untergrundkontamination ist die Suche nach schweren Higgs-Bosonen in supersymmetrischen Szenarien am LHC in einem „blinden Keil“ des Parameterraumes für Higgs-Massen jenseits von 200 GeV und mittlere Mischungswinkel nicht möglich. Resonanzformation der skalaren und pseudoskalaren Higgs-Bosonen in Photon-Photon Stößen, erzeugt im Compton-Mode von TESLA, kann jedoch diese Problemzone überdecken [DESY 00-192].

Wenn Higgs-Bosonen gefunden worden sind, wird es eine zentrale Aufgabe sein, ihre Eigenschaften detailliert zu bestimmen, unter anderem die Spin- und Paritäts-Quantenzahlen. Diese Aufgabe kann in der Higgs-Strahlung der Teilchen an e^+e^- -Linear-Collidern gelöst werden [DESY 01-010, 192]. Die Kombination von Schwelleneffekten in der Anregungskurve mit Winkelkorrelationen wird es erlauben, die externen Quantenzahlen des Higgs-Bosons in der Standard-Theorie modellunabhängig experimentell zu bestimmen (Abb. 60).

Von gleicher Bedeutung ist die Messung der Kopplungen von Higgs-Bosonen untereinander. Dies ist ein weites Feld in supersymmetrischen Theorien, in denen der Higgs-Sektor von außerordentlich komplexer Natur ist. In e^+e^- -Linear-Collidern wie auch teilweise

im LHC können diese Kopplungen in Teilbereichen des Parameterraums gemessen werden [DESY 01-015]. Dies sind essenzielle Experimente, da die elektroschwache Symmetriebrechung *sui generis* durch die Selbst-Kopplungen bewirkt wird.

Supersymmetrie

Präzisionsmessungen der Masse des W-Bosons und der Vergleich mit der theoretischen Vorhersage wie auch die Vereinigung der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Kraft bei sehr hohen Energien deuten auf die Existenz von Supersymmetrie (SUSY) hin. Hierbei wird jedem Standardmodell-Teilchen ein supersymmetrischer Partner zugeordnet, der sich um eine halbe Einheit in der Spin-Quantenzahl unterscheidet. Da die Teilchen und ihre Superpartner nicht dieselbe Masse besitzen, muss diese Symmetrie bei niedrigen Energien verletzt sein, was zu einer Vielzahl von unbekanntem Parametern in der Theorie führt. Experimente an zukünftigen Collidern müssen diese unbekanntem Parameter bestimmen, so dass die Struktur der zugrunde liegenden supersymmetrischen Theorie eindeutig rekonstruiert werden kann.

Hierzu gehört es, zu beweisen, dass die Eichkopplungen im Standardmodell identisch zu denen sind, die zwischen den entsprechenden supersymmetrischen Partnern von Quarks und Leptonen wirken [DESY 01-088]. Ebenfalls muss die Äquivalenz der Quantenzahlen der Standardmodell-Teilchen und ihrer SUSY-Partner überprüft werden. So sollten die skalaren Partner von Elektronen mit denselben chiralen Quantenzahlen wie diejenigen der Elektronen assoziiert sein. Dies lässt sich nur an einem Linear-Collider zeigen, der gleichzeitig polarisierte Elektronen- und Positronenstrahlen zur Verfügung stellt [DESY 00-178, 01-173].

Die Präzisionsmessungen bei TESLA werden es auch erlauben, die Massen der neuen Teilchen mit so hoher Genauigkeit zu bestimmen, dass selbst in den theoretischen Vorhersagen Effekte der endlichen Lebensdauern der neuen Teilchen berücksichtigt werden müssen [DESY 01-066].

Durch die Brechung der Supersymmetrie mischen die SUSY-Partner der geladenen und neutralen Eich- und Higgs-Bosonen untereinander. Die experimentelle Be-

stimmung der Mischungsanteile gibt direkten Aufschluss über die Struktur des supersymmetrischen Modells. Für die Rekonstruktion dieser Mischungsanteile ist ein Linear-Collider durch Präzisionsmessungen mit Hilfe polarisierter Strahlen besonders geeignet [DESY 00-098, 01-088], wobei die Auswertung von Winkel- und Energieverteilungen charakteristisch für den zugrunde liegenden Dirac- bzw. Majorana-Charakter der supersymmetrischen Fermionen ist [DESY 01-117].

Teilchenphysik am XFEL

Der Freie-Elektronen Laser im Röntgenbereich (XFEL) bietet dank seiner hohen Leistungsdichte neue Möglichkeiten für die Grundlagenforschung in der Teilchenphysik [DESY 01-213].

So kann man sich die mögliche hohe Leistungsdichte am Fokus eines XFEL zunutze machen, um das Vakuum gewissermaßen „zum Kochen“ zu bringen und zum ersten Mal die von der Quantenelektrodynamik vorhergesagte spontane e^+e^- -Paarerzeugung in einem sehr starken äußeren elektrischen Feld zu beobachten [DESY 01-024]. Dieser fundamentale Prozess hat viele Analogien in der kontemporären Physik, von der Evaporation von Schwarzen Löchern bis zur Teilchenproduktion in hadronischen Kollisionen. Eine weitere interessante Anwendung eines XFELs wären die Produktion und der Nachweis von Axionen, hypothetischen leichten Teilchen, die im Rahmen von Lösungen des so genannten „starken CP-Problems“ postuliert wurden [DESY 01-213].

Neutrino-Physik und Kosmologie

Die Urknall-Kosmologie sagt die Existenz eines Hintergrund-Gases freier Photonen und Neutrinos voraus. Die gemessene kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung bestätigt die Anwendbarkeit der Standard-Kosmologie zurück bis zur Ära der Photon-Entkopplung, etwa hunderttausend Jahre nach dem Urknall. Die Hintergrund-Neutrinos andererseits entkoppelten schon etwa eine Sekunde nach dem Urknall. Ihr Nachweis, mit einer vorhergesagten mittleren Dichte von etwa 56 Neutrinos pro Kubikzentimeter und Neutrinospezies, würde daher ein neues Fenster

auf das frühe Universum öffnen. Der direkte Nachweis ist jedoch bis heute auf Grund der Schwäche der Neutrino-Wechselwirkungen nicht gelungen. In letzter Zeit wurde eine Möglichkeit des indirekten Nachweises diskutiert. Er basiert auf so genannten Z-Bursts, welche aus der resonanten Vernichtung von höchst-energetischen kosmischen Neutrinos mit kosmischen Hintergrund-Antineutrinos in Z-Bosonen resultieren.

Auf der Z-Resonanz ist die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit um mehrere Größenordnungen erhöht. Interessanterweise sind die Resonanzenergien im Ruhesystem der Hintergrund-Neutrinos, $E_{\nu_i}^{\text{Res}} = 4 \cdot 10^{21} \text{ eV}/m_{\nu_i} [\text{eV}]$, von der Größenordnung der höchst-energetischen, in Luftschauerexperimenten beobachteten kosmischen Strahlung, falls die Neutrinos eine Masse von $m_{\nu_i} = 0.1 - 1 \text{ eV}$ haben. Unter der Annahme, dass die höchstenergetische kosmische Strahlung bei Energien oberhalb von $4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ hauptsächlich Protonen aus Z-Bursts sind, und dass genügend ultrahoch-energetische kosmische Neutrinos vorhanden sind, lässt sich die erforderliche Masse des schwersten Neutrinos zu $m_{\nu_3} = 0.26_{-0.14(0.22)}^{+0.20(0.50)} \text{ eV}$ bestimmen [DESY 01-048, 070, 189]. Diese Vorhersagen lassen sich durch weitere Untersuchungen im Labor, in der Kosmologie, an Neutrinooteleskopen und an Luftschauerexperimenten testen.

Massive Neutrinos können entweder Dirac- oder Majorana-Teilchen sein; im letzteren Fall vermitteln sie die Leptonzahl-Verletzung und können eine charakteristische Signatur in Beschleuniger-Experimenten und in seltenen Mesonen-Zerfällen durch die Erzeugung von gleichgeladenen Leptonen hinterlassen. Solche Ereignisse mit der Erzeugung von Myonen oder Tau-Leptonen können am LHC beobachtet werden, wenn die schweren Majorana-Neutrinos leichter als 5 TeV sind; für Ereignisse mit Elektronen dagegen liegt der Wirkungsquerschnitt unter der LHC-Sensitivität wegen der Schranken aus dem neutrinolosen doppelten β -Zerfall [DESY 01-051, 207].

Majorana-Neutrinos sind auch die Basis für Modelle der Baryogenese durch die Erzeugung einer Lepton-Asymmetrie in dem Zerfall schwerer rechtshändiger Neutrinos, der so genannten Leptogenese [DESY 01-101]. In solchen Modellen wird die Baryon-Asymmetrie normalerweise unter der Voraussetzung des thermischen Gleichgewichts und ohne Berücksichtigung der chemischen Potentiale der Standardmodell-

Teilchen berechnet. Effekte dieser chemischen Potentiale sind eine größere Diffusion und eine Reduzierung der Baryon-Asymmetrie [DESY 01-046].

Inflation und dunkle Materie

Im Berichtsjahr gab es sehr interessante neue Resultate in der Messung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. Die Beobachtungen der Boomerang- und Maxima-Experimente und der DASI- und CBI-Interferometer haben mit hoher Präzision gezeigt, dass unser Universum euklidisch ist, entsprechend der Vorhersage von Inflationsmodellen [DESY 01-195]. Leider ist es noch nicht möglich, zwischen den verschiedenen Modellen zu entscheiden. Sehr interessant sind die Modelle der Hybrid-Inflation in supersymmetrischen Theorien, wo die inflationäre Dynamik von der Supersymmetriebrechung bestimmt wird [DESY 00-082]. In diesem Fall kann der Phasenübergang am Ende der Inflation und die Entstehung von kosmologischen Defekten analytisch beschrieben werden [DESY 01-019]. In supersymmetrischen Inflationsmodellen mit niedriger Skala kann außerdem Leptogenese durch den Affleck-Dine Mechanismus realisiert werden; um die beobachtete Baryon-Asymmetrie zu erhalten, muss das leichteste Neutrino eine Masse von 10^{-4} eV haben [DESY 01-142].

Im Fall niedriger Temperatur nach der Inflation, das heißt unterhalb von 10^6 GeV, könnte die dunkle Materie des Universums aus exotischen Teilchen, Axinos, den Superpartnern von Axionen, bestehen. Solche Teilchen haben sehr schwache Kopplungen an Materie und würden nie das thermische Gleichgewicht erreichen, aber in genügender Anzahl durch Neutralino-Zerfälle und andere thermische Streuprozesse erzeugt werden [DESY 00-193].

Die Supernova-Daten über die Beschleunigung der Ausdehnung des Universums deuten auf die Anwesenheit einer homogenen Komponente der Energiedichte hin; dies könnte entweder eine kosmologische Konstante oder die potentielle Energie eines skalaren Feldes sein (Quintessenz). Durch die Messung der Zustandsgleichung dieser Energiekomponente können diese zwei Möglichkeiten unterschieden werden [DESY 01-147, 165].

Schon seit geraumer Zeit wurde spekuliert, dass bei der Kollision von Teilchen mit Schwerpunktsenergien ober-

halb der Planckskala $M_{\text{pl}} = 10^{19}$ GeV (Mini-) Schwarze Löcher produziert werden. Diese wegen der hohen Energien experimentell nicht nachprüfbar Möglichkeit rückte in letzter Zeit in Reichweite im Kontext von Theorien jenseits des Standardmodells, welche mehr als vier Raumzeit-Dimensionen und eine neue fundamentale Planckskala $M_D \gtrsim 1$ TeV postulieren. Am LHC bei CERN mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV könnte die Produktion und Evaporation von Schwarzen Löchern im Detail untersucht werden. Aber schon vor der Inbetriebnahme des LHC kann in Luftschauerexperimenten, insbesondere am Pierre Auger-Observatorium in Argentinien, nach den Signaturen der Produktion von Schwarzen Löchern in der Kollision von ultrahochenergetischen kosmischen Neutrinos mit Nukleonen in der Atmosphäre gesucht werden. Je nach Menge der ultrahochenergetischen kosmischen Neutrinos lassen sich eventuell die ersten Zeichen der Produktion von Schwarzen Löchern bei Auger noch vor dem Start von LHC beobachten. Des Weiteren können schon jetzt sinnvolle Einschränkungen an die Produktion von Schwarzen Löchern aus der Tatsache der Nichtbeobachtung von horizontalen Luftschauern durch die Fly's Eye-Collaboration in Utah (USA) angegeben werden [DESY 01-182].

Vereinheitlichte Theorien

Im Zusammenhang mit den neuen experimentellen Hinweisen auf Neutrinomassen und -mischungen sind vereinheitlichte Theorien mit der Eichgruppe $SO(10)$ von aktuellem Interesse. Die Brechung dieser Symmetrie auf die Standardmodell-Eichgruppe kann auf einfache Weise mit Hilfe einer „Orbifold-Kompaktifizierung“ realisiert werden, ausgehend von einer Theorie in sechs Raum-Zeit-Dimensionen [DESY 01-106]. $SO(10)$ -Relationen zwischen Yukawa-Kopplungen sowie der „Seesaw“-Mechanismus verknüpfen Neutrino-Eigenschaften mit Quarkmassen und -mischungen. Dabei führen große Neutrinomischungen auf eine starke Einschränkung der freien Parameter. Dies führt zu Vorhersagen für CP-Verletzung in Neutrino-Oszillationen, den neutrinolosen doppelten β -Zerfall und die kosmologische Baryon-Asymmetrie [DESY 01-115].

Von aktuellem Interesse sind Erweiterungen des Standardmodells mit einer weiteren Raum-Dimension und Kaluza-Klein-Anregungen von Elementarteilchen mit

Massen im TeV-Bereich. Eine Analyse im Rahmen des Randall-Sundrum-Modells zeigt dabei, dass elektroschwache Präzisionstests zu einer unteren Massenschranke für angeregte W- und Z-Bosonen von etwa 10 TeV führen [DESY 01-201].

Gittereichtheorien

Die Gitterformulierung der Quantenfeldtheorie ermöglicht es, verschiedene Parameter der starken Wechselwirkung von Quarks und Gluonen, die im Rahmen der Quantenchromodynamik beschrieben wird, in numerischen Simulationen zu berechnen. Wichtige Beispiele der berechneten Parameter sind Hadron-Massen, hadronische Matrixelemente der elektroschwachen Ströme, die starke Kopplungskonstante, die Quarkmassen, die Parameter der niederenergetischen chiralen Lagrange-Funktion und die thermodynamischen Eigenschaften der Hadron-Materie bei hohen Temperaturen oder hohen Baryondichten.

Die numerischen Monte Carlo-Simulationen werden auf leistungsfähigen Computern durchgeführt, die die Parallelverarbeitung auf vielen Prozessoren ermöglichen. Für diese Arbeit stehen im NIC, DESY-Zeuthen, APE-Spezialrechner und im NIC, Jülich, die CRAY-T3E zur Verfügung. Seit kurzem sind auch in DESY-Hamburg PC-Cluster zu diesem Zweck im Einsatz.

Quantenchromodynamik

Die Theoriegruppe in Hamburg hat sich in letzter Zeit mit der Frage beschäftigt, ob man die Polarisierungseffekte des Strange-Quarks in die Monte Carlo-Simulationen einbauen könnte. Bis jetzt wurden die meisten Rechnungen nur mit Berücksichtigung des Up- und Down-Quarks gemacht, weil der verwendete Simulationsalgorithmus nur eine gerade Anzahl von Quarks mit paarweise gleichen Massen behandeln konnte. Es wurde ein neuer, so genannter multi-bosonischer Algorithmus entwickelt und getestet, der für eine beliebige Zahl von Quarks mit verschiedenen Massen anwendbar ist [DESY 01-159]. Die Bestimmung der Kopplungs-Koeffizienten der Gasser-Leutwyler'schen chiralen Lagrange-Funktion mit Hilfe dieses Algorithmus wurde vorbereitet.

In einem weiteren Projekt wurden die Eigenschaften von Gitterfermionen mit exakter chiraler Symmetrie, so genannte Ginsparg-Wilson-Fermionen, untersucht. Diese Formulierung, obgleich numerisch wesentlich aufwendiger als herkömmliche Diskretisierungen, eignet sich besonders zum Studium der spontanen chiralen Symmetriebrechung in der QCD. Hierbei wird typischerweise untersucht, ob sich ein Quark-Kondensat bildet. Ein wesentlicher Bestandteil numerischer Rechnungen ist die Renormierung der für das Kondensat relevanten Operatoren in der Gitter-Theorie. Es konnte gezeigt werden, dass eine nicht-perturbative Renormierung des Kondensats für Ginsparg-Wilson-Fermionen möglich ist [DESY 01-083]. Ein wesentliches Element hierbei ist die Anpassung der chiral-symmetrischen Gitterregularisierung an eine intermediäre Wilson-Regularisierung. Die Rechnung ist so angelegt, dass jeder Bezug auf das intermediäre Schema im Endresultat herausgekürzt wird. Durch diese Methode kann ein wesentlicher systematischer Effekt in Gitterrechnungen mit Ginsparg-Wilson-Fermionen unter Kontrolle gebracht werden. Numerische Resultate für das renormierte Kondensat sowie für die Masse des Strange-Quarks und die Pion-Zerfallskonstante liefern Hinweise, dass der Einfluss von Gitterartefakten für Ginsparg-Wilson-Fermionen recht klein ist [DESY 01-174].

Eigenschaften der Materie bei hohen Quark-Dichten

In der Quantenchromodynamik wird erwartet, dass bei sehr hohen Baryondichten (oberhalb der normalen Dichte von Atomkernen oder Neutronensternen) die Materie nicht mehr aus Hadronen besteht, sondern sich am besten mit den elementaren Quark- und Gluon-Freiheitsgraden beschreiben lässt. Eine wesentliche Änderung im Vergleich zur Kernmaterie ist die Erscheinung von Diquark-Paar-Kondensaten. Dies kann zu interessanten Phänomenen wie Supraleitung oder Superfluidität führen, die für große Neutronensterne vorhergesagt werden.

Im Rahmen eines europäischen TMR-Projekts hat die DESY-Swansea-Kollaboration eine Modelluntersuchung der Diquark-Kondensation mit Quarks in der adjungierten Darstellung der SU(2)-Farbgruppe durchgeführt [DESY 01-139, 152]. Die erwartete

Phasenübergangsstruktur als Folge der Diquark-Kondensation wurde bestätigt.

Außerdem wurde der Endpunkt der Phasenübergangslinie in der Ebene der Temperatur und Baryondichte bestimmt [DESY 01-044, 057].

Supersymmetrie-Brechung in der Yang-Mills-Theorie

Die supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells setzen die spontane Brechung der Supersymmetrie voraus. Zahlreiche Modelle für die Supersymmetrie-Brechung basieren auf den nichtstörungstheoretischen Eigenschaften der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie. Diese Theorie beschreibt die Wechselwirkung des Eichfelds mit einem masselosen Majorana-Fermionfeld in der adjungierten Darstellung [DESY 01-113, 214]. In der Gitter-Regularisierung wird die Supersymmetrie bei nichtverschwindender Gitterkonstante durch Gitterartefakte gebrochen. Eine konsistente Beschreibung setzt die Wiederherstellung der Supersymmetrie im Kontinuumslimes voraus.

In der supersymmetrischen Yang-Mills-Theorie mit $SU(2)$ -Eichgruppe hat die DESY-Münster-Roma-Kollaboration die Ward-Takahashi-Identitäten der Supersymmetrie untersucht [DESY 01-141, 157, 158]. Die numerischen Resultate sind, innerhalb der statistischen und systematischen Fehler, konsistent mit der erwarteten Realisierung der Supersymmetrie im Kontinuumslimes.

Simulationsalgorithmen

Ein wichtiger Teil der Arbeit wurde der Entwicklung multi-bosonischer Simulationsalgorithmen gewidmet. Insbesondere die Möglichkeit der Simulation leichter Quarks wurde untersucht [DESY 01-148, 149, 187]. Die Zielsetzung ist, die Simulationen in einem Bereich kleiner Quarkmassen durchzuführen, wo mit Hilfe der chiralen Lagrangefunktion die Extrapolation zum physikalischen Punkt mit kontrollierten Fehlern möglich wird.

Die Gittereichtheorie hat sicher wesentlich dazu beigetragen, das Quark-Confinement als dynamische Eigen-

schaft der QCD plausibel zu machen. Es ist allerdings nicht so leicht, die Kräfte zwischen statischen Quarks bei Abständen größer als 1 f durch numerische Simulation genau zu bestimmen, weil in diesem Bereich das Verhältnis zwischen Signal und statistischem Fehler exponentiell abfällt. Aus diesem Grund war es unter anderem bisher nicht möglich, zweifelsfrei zu zeigen, dass sich zwischen den Quarks eine chromo-elektrische Flussröhre bildet, die bei hinreichend großen Distanzen durch eine effektive bosonische Stringtheorie beschrieben werden kann.

Ein neuer Simulationsalgorithmus, der durch hierarchische Mittelungen eine exponentielle Unterdrückung der statistischen Fluktuationen erreicht, könnte an dieser Stelle zu deutlichen Fortschritten führen. Zwar liegen noch keine physikalischen Ergebnisse vor, aber ausführliche Tests haben ergeben, dass die neue Methode gegenüber den traditionellen Verfahren um Größenordnungen effizienter ist [hep-lat/0108014].

Gitter-QCD auf PCs

Für numerische Simulationen der Gitter-QCD werden heute zunehmend auf PC-Prozessoren basierende kommerzielle Parallelrechner eingesetzt. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung liegt darin, dass PC-Prozessoren im Bereich der Fließkomma-Arithmetik und der Speicherbandbreite inzwischen sehr hohe Leistungswerte erreichen [hep-lat/0110007]. Den bisher bevorzugten Spezialrechnern ist damit eine in Bezug auf das Preis-Leistungs-Verhältnis konkurrenzfähige und aus der Sicht der Programmierbarkeit attraktive Alternative erwachsen.

Quantengravitation

Eines der großen Probleme der Quantenfeldtheorie ist ihre Vereinbarkeit mit dem Lokalisationsprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die allgemein kovariante Formulierung der Quantenfeldtheorie auf gekrümmten Raumzeiten, einschließlich der Renormierung, die in den letzten Jahren durchgeführt worden ist, ist im generischen Fall einer Raumzeit mit trivialer Symmetriegruppe nicht lokal in dem Sinne, dass globale Information über die Struktur der Raumzeit in die Kon-

struktion eingeht. Dies führt zu dem Problem, dass Renormierungsvorschriften an verschiedenen Raumzeitpunkten nicht miteinander verglichen werden können. Kürzlich wurde ein neues Paradigma für Quantenfeldtheorien auf Mannigfaltigkeiten vorgeschlagen: Quantenfeldtheorien werden danach simultan auf allen Raumzeiten einer geeigneten Klasse (beispielsweise global hyperbolisch) erklärt, so dass zu jeder Einbettung einer Raumzeit in eine andere ein Homomorphismus der zugehörigen Operatoralgebren gehört [math-ph/0112041]. Mathematisch handelt es sich bei dieser Struktur um einen kovarianten Funktor zwischen der Kategorie der Raumzeiten und der der Operatoralgebren. Mit Hilfe dieses neuen Prinzips konnte die Renormierungsfreiheit auf endlich viele Parameter eingeschränkt werden [gr-qc/0111108]. Weiter konnte das Spin-Statistik-Theorem auf gekrümmten Raumzeiten bewiesen werden.

Andere Arbeiten beschäftigten sich mit Lokalisierungseigenschaften von Quantenfeldtheorien auf dem

Minkowski-Raum und dem klassischen Limes [DESY 01-002], der allgemeinen Beschreibung von Symmetrien in der störungstheoretischen Quantenfeldtheorie [hep-th/0111101], der Renormierungsgruppe, der Operatorproduktentwicklung und dem Energie-Impuls-Tensor. Zur Rolle der Zeit in der Quantentheorie wurde ein neuer Vorschlag gemacht, der es gestattet, die Wahrscheinlichkeiten für den Zeitpunkt eines Ereignisses zu berechnen [DESY 01-038].

Neben diesen Untersuchungen, bei denen eine kontinuierliche Raumzeit vorausgesetzt wird, wurden die Arbeiten an einer Ausdehnung der Konzepte der Quantenfeldtheorie auf eine nichtkommutative Raumzeit fortgesetzt. Diese Arbeiten sind motiviert durch die Vermutung, dass die Nichtkommutativität der Raumzeitkoordinaten eine approximative Beschreibung von Quanteneffekten der Gravitation gestattet. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Fragen des geeigneten Lokalitätsbegriffs, der Eichinvarianz, der Renormierbarkeit und der Unitarität.