

Mit Präzision zu neuen Phänomenen

Liefert die elektroschwache Wechselwirkung bei höchsten Energien Überraschungen?

Ulla Blumenschein, Ulrich Uwer und Roger Wolf

Neben der direkten Suche nach neuen physikalischen Phänomenen bei höchsten Energien erlaubt der Large Hadron Collider auch Präzisionsmessungen, mit denen sich die Vorhersagen des Standardmodells der Elementarteilchen genau überprüfen lassen. Mögliche Inkonsistenzen und Abweichungen der Messungen von den Vorhersagen können indirekte Hinweise auf bisher unentdeckte Effekte geben.

Eine Vielzahl von Messungen hat das Standardmodell der Teilchenphysik in den letzten Jahrzehnten mit beindruckender Präzision bestätigt. Dennoch wissen wir, dass diese Theorie unvollständig sein muss: Sie liefert weder Kandidaten für die im Universum nachgewiesene Dunkle Materie noch kann sie die Materie-Antimaterie-Asymmetrie unserer Welt erklären. Konzeptionelle Fragen, wie etwa die tiefere Ursache der beobachteten drei Generationen von Quarks und Leptonen, bleiben offen. Daher gilt das Standardmodell heute als eine Näherung einer umfassenderen Theorie, die mit neuen, an höheren Energieskalen beobachtbaren Phänomenen einhergehen sollte.

Zum Aufspüren dieser neuen Phänomene sind weitere Präzisionsmessungen essenziell. Sie dienen zum einen dazu, die noch ungenau bekannten Parameter des Standardmodells besser zu bestimmen, um präzisere Vorhersagen machen zu können. Zum anderen ermöglichen sie den Nachweis von theoretisch vorhergesagten Quantenfluktuationen. Diese Fluktuationen, zu denen im Rahmen der Unschärferelation kurzzeitig auch sehr schwere Teilchen beitragen, können Größen wie Teilchenmassen und Kopplungskonstanten, aber auch die Zerfallseigenschaften von Teilchen beeinflussen. Grundsätzlich gilt, dass Quantenkorrekturen höherer Ordnung, bei denen also eine größere Zahl an Teilchenkopplungen auftritt, gegenüber einfacheren Prozessen unterdrückt sind.

Die Messung der teilweise sehr kleinen Quanteneffekte erlaubt Rückschlüsse auf die Eigenschaften der in den Fluktuationen virtuell auftretenden Teilchen. So ließ sich die Masse des Top-Quarks aus präzisen Daten zum Z-Boson vorhersagen, noch bevor es gelang, das Top-Quark direkt nachzuweisen. Präzisionsmessungen unterstützen auch die Suche nach dem Higgs-Boson, da Quantenkorrekturen mit einem virtuellen Higgs-Boson die Massen schwerer Teilchen wie Top-Quark und W-Boson beeinflussen (Abb. 1). Daher schränken

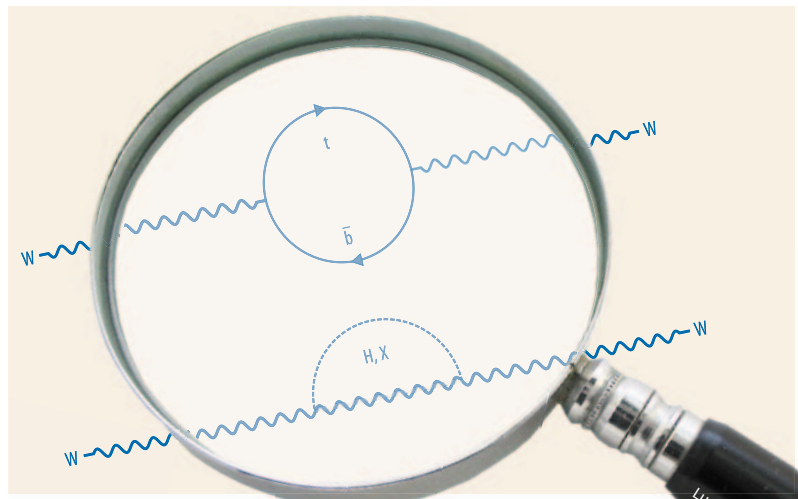


Abb. 1 Die Masse des W-Bosons hängt über Quantenfluktuationen auch von den Eigenschaften anderer Teilchen ab. Dazu zählen beispielsweise ein Paar aus Top- und Anti-Bottom-Quark, ein Higgs-

Boson oder ein noch unbekanntes Teilchen X. Die Messung dieser kleinen Massenkorrektur erlaubt es, indirekt auf die Existenz der ausgetauschten Teilchen zu schließen.

die experimentell bestimmten W- und Top-Massen die mögliche Higgs-Masse weiter ein. So deuten die am LEP2- bzw. Tevatron-Beschleuniger erzielten Ergebnisse auf eine kleine Higgs-Masse nahe der bisherigen Ausschlussgrenze von $114 \text{ GeV}/c^2$ hin (Abb. 2) [1]. Für eine präzisere Aussage wäre es nötig, die W-Masse genauer zu kennen. Wird das Higgs-Boson direkt nachgewiesen, erlaubt der Vergleich von direkt und indirekt ermittelter Higgs-Masse einen wichtigen Konsistenztest des Standardmodells.

Neben den Teilchen des Standardmodells sollten sich aber auch weitere bislang unbekanntes, beispiels-

KOMPAKT

- Da am LHC hunderte von W- und Z-Bosonen pro Sekunde entstehen, lassen sich die Eigenschaften dieser Teilchen mit bisher unerreichter Genauigkeit untersuchen. Die genaue Messung der W-Masse ermöglicht dabei indirekte Vorhersagen zur Masse des Higgs-Bosons.
- Auch für die Masse und andere Eigenschaften des Top-Quarks, des schwersten Teilchens des Standardmodells, versprechen die LHC-Experimente präzisere Werte.
- Die Beobachtung von Oszillationen zwischen B-Mesonen und ihren Antiteilchen sowie die bislang vergebliche Suche nach seltenen Zerfällen dieser Teilchen erlauben bereits, einige Erweiterungen des Standardmodells auszuschließen.

Dr. Ulla Blumenschein, II. Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen; Prof. Dr. Ulrich Uwer, Physikalisches Institut, Universität Heidelberg, Philosophenweg 12, 69120 Heidelberg; Dr. Roger Wolf, CERN, 1211 Genf 23, Schweiz

weise supersymmetrische Teilchen in den Quantenkorrekturen bemerkbar machen und zu messbaren Effekten führen, die von der Vorhersage des Standardmodells abweichen. **Abb. 1** zeigt einen möglichen Beitrag eines neuen Teilchens, hier generisch mit X bezeichnet, der die beobachtbare Masse des W-Bosons beeinflussen würde.

Wenn die Protonenpakete am LHC kollidieren, sind es die Bausteine der Protonen, die Quarks und Gluonen, die miteinander in Wechselwirkung treten. Da diese Teilchen keinen festen Bruchteil der Protonenenergie tragen, erstreckt sich in ihren Kollisionen das Energiespektrum von wenigen 100 MeV bis zur TeV-Skala. Entsprechend entstehen dabei sowohl relativ leichte Teilchen wie gebundene Quark-Antiquark-Zustände mit Charm- oder Bottom-Quarks als auch schwere Teilchen wie W- und Z-Bosonen oder die noch schwereren Top-Quarks in großen Raten. Diese Teilchen zerfallen und machen sich beispielsweise in der beobachteten Produktionsrate für Paare geladener Myonen bemerkbar (**Abb. 3**) [2].

Neues von alten Bekannten: W- und Z-Bosonen

Der erste Schritt auf dem Weg zu neuen Präzisionsmessungen besteht darin, anhand von wohlverstandenen Prozessen das theoretische Handwerkszeug und das Verständnis der experimentellen Grundlagen zu prüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Dazu eignet sich insbesondere die Produktion der W- und Z-Bosonen, da ihre Wechselwirkungen mit anderen Teilchen gut bekannt sind und sie sich aufgrund ihrer klaren Zerfallssignaturen gut von Untergrundprozessen trennen lassen. Mittlerweile erzeugt der LHC hunderte dieser Bosonen pro Sekunde. Bereits die Daten des ersten Jahres lieferten wichtige Erkenntnisse zu Produktionsraten, Winkel- und Impulsverteilungen dieser Austauscheteilchen.

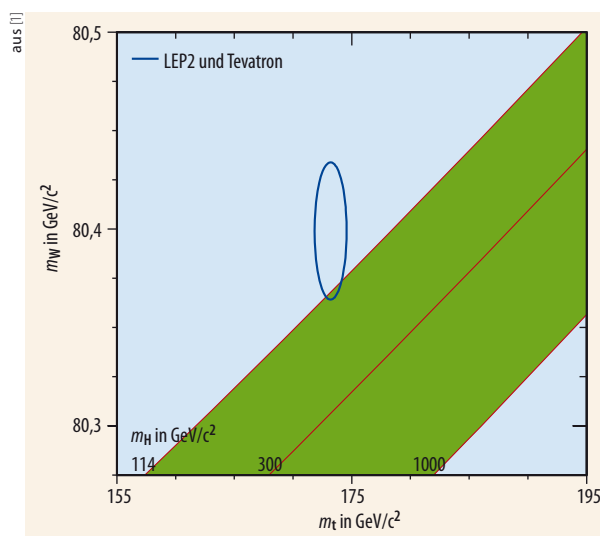


Abb. 2 Die Fehler-Ellipse der experimentell bestimmten Massen des Top-Quarks und des W-Bosons überschneidet sich nur in einem kleinen Gebiet mit der Vorhersage des Standardmodells für Higgs-Massen zwischen 114 GeV/c^2 und 1 TeV/c^2 .

Die ersten Ergebnisse zur Produktionsrate von W- und Z-Bosonen, also zur Wahrscheinlichkeit, diese Teilchen in einer Proton-Proton-Kollision zu erzeugen, zeigen, dass diese Rate als Funktion der Schwerpunktsenergie ansteigt (**Abb. 4**) [3]. Dies stimmt sehr gut mit den theoretischen Vorhersagen überein. Insbesondere bestätigen die Messungen damit auch die physikalische Beschreibung der Proton-Proton-Kollision selbst, die von niedrigeren Energien an die LHC-Skala extrapoliert wurde. Bemerkenswert ist auch, dass diese Messungen bereits in den ersten Monaten der Hochenergiephase eine solche Genauigkeit erreichten.

Eine wichtige künftige Aufgabe besteht darin, die Masse des W-Bosons präzise zu messen. Diese vom Standardmodell nicht direkt vorhergesagte Größe ist dank LEP und Tevatron mit einer Genauigkeit von 0,03 % bekannt [4].¹⁾ Diese Unsicherheit limitiert derzeit deutlich die bereits erwähnten indirekten Vorhersagen der Higgs-Masse. Inzwischen gelang es bereits, eine große Zahl von W-Bosonen nachzuweisen und einen Großteil der unterstützenden Messungen vorzunehmen. Daher hoffen die LHC-Kollaborationen nun, auch die systematischen Unsicherheiten ausreichend begrenzen zu können, um die Masse des W-Bosons mit größerer Präzision als bisher zu bestimmen.

Andere Messungen, deren Präzision am Tevatron bisher durch sehr geringe Raten limitiert war, sind bereits heute mit höherer Genauigkeit am LHC möglich. Eine sehr wichtige Vorhersage des Standardmodells, die spezifisch für seine spezielle mathematische Struktur ist, betrifft die Wechselwirkungen der Austauschbosonen untereinander. So sagt das Modell beispielsweise exakt vorher, mit welcher Rate W-Bosonen Z-Bosonen abstrahlen, während die Kopplung eines Z-Bosons mit sich selbst verboten ist. Derartige Wechselwirkungen sind wiederum empfindlich auf Einflüsse neuer physikalischer Phänomene, die bei sehr hohen Energien auftreten können. Die ersten Messungen am LHC im Sommer 2011 bestätigen die Vorhersagen des Standardmodells und deuten nicht auf neue Phänomene hin. Weitere Daten und ausgefeiltere Methoden versprechen in den kommenden Jahren eine erheblich größere Genauigkeit dieser Messungen.

Top-Quarks in großer Zahl

Das schwerste bekannte Teilchen des Standardmodells ist das Top-Quark [5]. Obwohl es im Standardmodell als ein punktförmiges Elementarteilchen behandelt wird, ist es über 170-mal schwerer als ein Proton und etwa 40-mal schwerer als das Bottom-Quark, in das es unter Abstrahlung eines W-Bosons fast ausschließlich zerfällt. Das Top-Quark wurde 1995 am Tevatron-Beschleuniger entdeckt, dem bis zum Start des LHC einzigen Beschleuniger, an dem es sich erzeugen und vermessen ließ – allerdings mit einer sehr viel niedrigeren Produktionsrate. Am LHC ist die Produktion von Paaren aus Top- und Anti-Top-Quarks vor allem aufgrund der höheren Schwerpunktsenergie etwa

1) Mit den vorläufigen Ergebnissen der Tevatron-Experimente, die in diesem Frühjahr vorgestellt wurden, wird eine Präzision von 0,02 % erreicht.

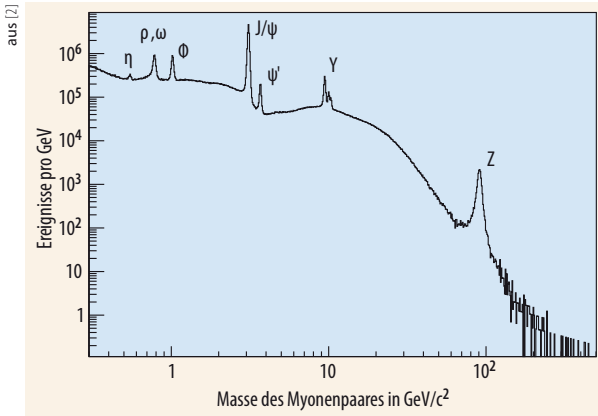


Abb. 3 Die Zahl der am CMS-Detektor registrierten Myonenpaare (Daten aus 2010) weist immer dann einen Peak auf, wenn die Masse des Paares derjenigen eines Teilchenzustands entspricht: Bei niedrigen Energien erscheinen zunächst die Meson-Resonanzen leichter Quarks, dann die beiden $c\bar{c}$ -Zustände (J/ψ und ψ' , $3 \text{ GeV}/c^2$), die $b\bar{b}$ -Resonanzen (Y , $10 \text{ GeV}/c^2$) und das Z-Boson ($91 \text{ GeV}/c^2$). W-Bosonen zerfallen nicht in Myonenpaare und sind daher nicht zu sehen.

20-mal größer. Daher gelang es bereits nach kurzer Zeit, das Top-Quark nachzuweisen. Die Produktionsrate wurde mittlerweile mit einer Präzision von 7 % gemessen. Die Ergebnisse bestätigen die theoretischen Vorhersagen [6].

Hinsichtlich der Top-Masse kann es die statistische Präzision der LHC-Messungen bereits seit Sommer 2011 mit den Messungen am Tevatron aufnehmen; der Wert $175 \pm 0,9 \text{ (stat.)} \pm 2,7 \text{ (syst.) GeV}/c^2$ [7] stimmt gut mit den Tevatron-Ergebnissen überein. Diese Messungen bilden jedoch nur den Auftakt: Verfeinerte Messmethoden versprechen deutlich geringere systematische Unsicherheiten und damit einen relativen Massenfehler von unter 1 %.

Aufgrund seiner großen Masse zerfällt das Top-Quark als einziges Quark, bevor es zusammen mit anderen Quarks Hadronen bilden kann. Die große Zahl produzierter Top-Quarks wird es deshalb erlauben, weitere fundamentale Eigenschaften des freien Quarks zu bestimmen. So lassen sich seine Spin-Eigenschaften aus der Winkelverteilung der Zerfallsprodukte und seine elektromagnetischen Eigenschaften aus der Abstrahlung von Photonen bestimmen. Für die leichten Quarks sind solche Messungen ungleich schwieriger, da diese zum Zeitpunkt ihres Zerfalls bereits in Hadronen gebunden sind. Schon bald wird das Top-Quark deshalb zu den am besten vermessenen Quarks gehören.

Mit B-Mesonen zu höchsten Energien

B-Mesonen, gebundene Quark-Antiquark-Zustände mit einem Bottom-Quark, liegen mit einer Masse von $5 \text{ GeV}/c^2$ am unteren Ende der LHC-Energieskala. Sie spielen aber bei der genauen Vermessung von Quantenkorrekturen und beim Test des Standardmodells eine besondere Rolle. Viele Zerfälle und Effekte, die sich bei diesen instabilen Teilchen beobachten lassen, finden alleine aufgrund von Quantenfluktuationen

statt. Beispiele dafür sind die Oszillationen eines neutralen B-Mesons in sein Antiteilchen (Abb. 5) oder die Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie in einigen Zerfällen von B-Mesonen. Die genaue Vermessung dieser Phänomene und der Vergleich mit den Vorhersagen des Standardmodells ermöglichen einen exzellenten Test der Theorie und eine sehr empfindliche Suche nach neuen Teilchen und Phänomenen bei höchsten Energien.

Eine systematische Suche nach neuen Effekten in den sehr seltenen Zerfällen von B-Mesonen war an den bisherigen Experimenten aufgrund der begrenzten Zahl registrierter B-Mesonen nicht möglich. Am LHC sind die Produktionsraten für B-Mesonen enorm hoch, beim LHCb-Experiment bis zu $2 \cdot 10^5$ pro Sekunde und bei ATLAS und CMS bis zu $1,5 \cdot 10^6$ /s. Damit ist es möglich, die Genauigkeit zu steigern und gleichzeitig neue, sehr seltene B-Zerfälle zu untersuchen. Bereits mit ihren ersten Daten haben die LHC-Experimente, insbesondere das eigens dafür gebaute LHCb-Experiment, die Präzision einer Reihe von Messgrößen verbessert.

Ein Beispiel ist die vom LHCb-Experiment gemessene Teilchen-Antiteilchen-Oszillation für neutrale B_s -Mesonen [8]: Mesonen, die als B_s oder \bar{B}_s erzeugt werden, oszillieren demnach zwischen diesen Zuständen als Funktion der Zeit. Gemessen wird die Asymmetrie zwischen dem Anteil der Teilchen, die sich beim Zerfall noch im ursprünglichen Zustand befinden, und dem Anteil der Teilchen, deren Quarkzustand gewechselt hat. Als Funktion der Zerfallszeit des Teilchens ist für diese Asymmetrie eine Cosinus-Funktion zu erwarten. Dies haben die LHCb-Daten von wenigen Monaten bestätigt (Abb. 5b). Zwar wurde dieser Effekt bereits vorher am Tevatron beobachtet, die LHCb-Daten erlauben aber bereits, die Oszillationsfrequenz um

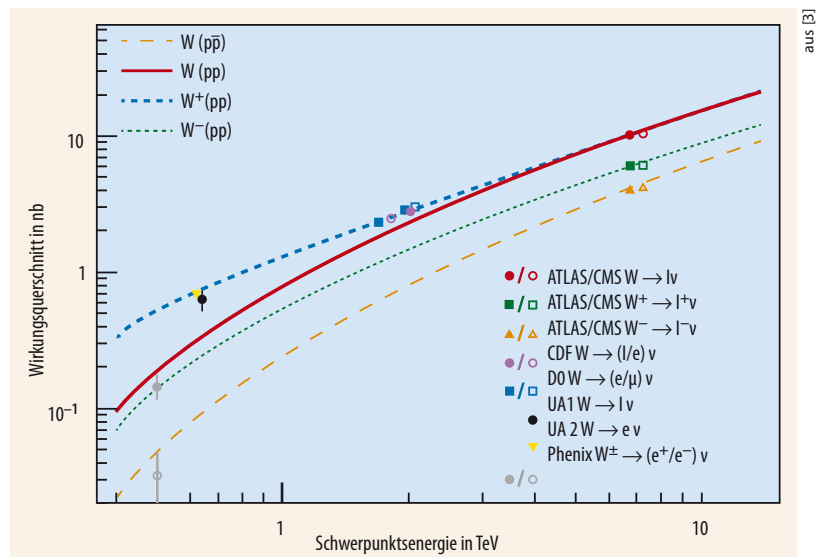


Abb. 4 Der Wirkungsquerschnitt für die Produktion von W-Bosonen mit anschließendem Zerfall in Leptonen steigt als Funktion der Schwerpunktsenergie der kollidierenden Protonen bzw. Antiprotonen an. Die Messwerte stammen von Detektoren an verschiedenen Beschleunigern und stimmen gut mit theoretischen Vorhersagen (Kurven) überein. Je nachdem, ob zwischen W^+ und W^- unterschieden wird oder nicht (sog. inklusive Produktion), unterscheiden sich die Kurven bzw. Messwerte.

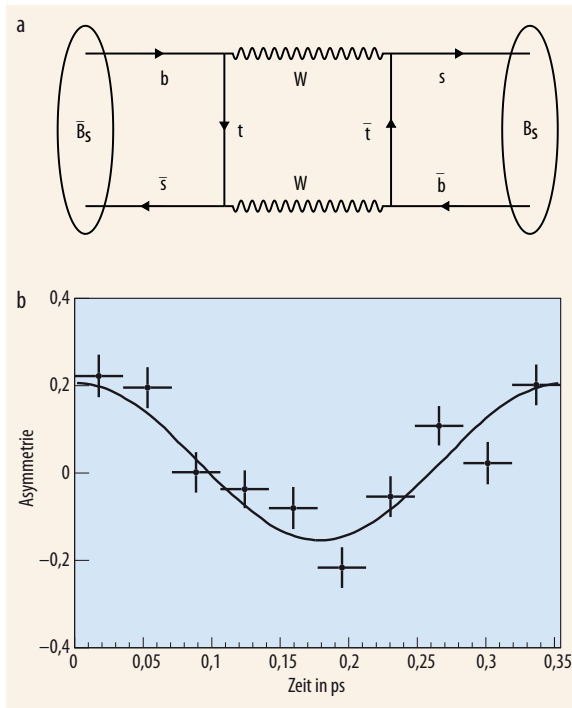


Abb. 5 Quantenkorrekturen führen zu Oszillationen zwischen B_s -Mesonen und ihren Antiteilchen \bar{B}_s (a). Die Asymmetrie zwischen dem Anteil der Mesonen, die sich beim Zerfall im ursprünglichen Zustand befinden, und dem Anteil derjenigen, deren Quarkzustand gewechselt hat, oszilliert als Funktion der Zerfallszeit. Zur besseren Darstellung sind die gemessenen Asymmetrien auf nur eine Oszillationsperiode gefaltet.

einen Faktor 2,5 genauer zu bestimmen, und zeigen eindrucksvoll das Potenzial des LHC in diesem Bereich der Physik.

Von den Tevatron-Experimenten gab es Hinweise auf eine vom Standardmodell abweichende Teilchen-Antiteilchen-Asymmetrie in Zerfällen von B_s -Mesonen, die auf die Existenz neuer Phänomene hindeuteten. Diese Abweichungen wurden mit den sehr viel präziseren Daten von LHCb nicht bestätigt [9]. Mögliche neue Phänomene in den zugehörigen Quantenkorrekturen müssen daher sehr klein sein. Bei der Suche nach sehr seltenen B-Zerfällen stoßen die LHC-Experimente mit ihrer Sensitivität in den Bereich von Zerfallswahrscheinlichkeiten von 10^{-9} vor [10]. Für den Zerfall eines B_s -Mesons in ein Myonenpaar, der nur aufgrund von Quantenkorrekturen höherer Ordnung möglich und im Standardmodell stark unterdrückt ist, liegt die derzeitige Sensitivität mit $4,5 \cdot 10^{-9}$ nur noch knapp über der theoretischen Erwartung von $3,6 \cdot 10^{-9}$. Bisher wurde in diesem Zerfallskanal kein Signal beobachtet, was mögliche Beiträge neuer Phänomene erheblich einschränkt und bereits eine Reihe von Modellen zur Erweiterung des Standardmodells ausschließt.

Auf zu neuen Standards?

Wie die hier beispielhaft gezeigten Resultate eindrucksvoll belegen, ist es den LHC-Kollaborationen schon im ersten Betriebsjahr gelungen, ihre hochkom-

plexen Apparaturen exzellent zu verstehen. Bereits heute erlauben es erste Präzisionsmessungen, die theoretischen Vorhersagen des Standardmodells zu verbessern und mittels Quantenfluktuationen nach neuen Teilchen zu fahnden. Die präzise Vermessung der durch neue Effekte bewirkten Quantenprozesse erweitert die Suche nach neuen Phänomenen weit über den Energiebereich des LHC hinaus. Präzisionsmessungen am LHC ergänzen so hervorragend die direkten Suchen nach neuen Phänomenen. Bisher gibt es noch keine Hinweise auf etwas „Neues“. „Korrekturen“ zum Standardmodell scheinen also klein zu sein. Deshalb wird es eine der wichtigsten Aufgaben der kommenden Jahre sein, die Natur und ihre theoretische Beschreibung mit höchster Präzision herauszufordern.

Literatur

- [1] M. Grünewald et al., LEP Electroweak Working Group, <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>
- [2] <http://cms.web.cern.ch/org/cms-papers-and-results>
- [3] ATLAS Collaboration, CERN-PH-EP-2011-143, arXiv: 1109.5141 (erscheint bei Phys. Rev. D); <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PAPERS/STDM-2011-06/>
- [4] Tevatron Electroweak Working Group, arXiv:0908.1374
- [5] D. Hirschi, W. Wagner und J. Wagner-Kuhr, Physik Journal, Juli 2009, S. 37
- [6] ATLAS Collaboration, Conf. Rep. CERN-ATLAS-2011-121; CMS Collaboration, Conf. Rep. CERN-CMS-PAS-TOP-11-024
- [7] ATLAS Collaboration, Conf. Rep. CERN-ATLAS-CONF-2011-120; CMS Collaboration (S. Chatrchyan et al.), JHEP 7, 49 (2011)
- [8] LHCb Collaboration, Conf. Rep. CERN-LHCb-Conf-2011-050
- [9] LHCb Collaboration (R. Aaij et al.), Phys. Rev. Lett. **108**, 101803 (2012)
- [10] L. Martini für die CMS Collaboration und J. A. Hernando für die LHCb Collaboration, Rencontres de Moriond EW 2012, 4.–10. März 2012, La Thuile, Italien

DIE AUTOREN

Ulla Blumenschein hat in Freiburg promoviert. Anschließend war sie Postdoc in Barcelona, bevor sie 2008 nach Göttingen wechselte. Seit 2005 arbeitet sie am ATLAS-Experiment, wo sie an der Inbetriebnahme des hadronischen Kalorimeters beteiligt war und die Messung der Produktion von Z-Bosonen in Assoziation mit Jets koordinierte.



Ulrich Uwer hat in Aachen studiert und promoviert, bevor er als Postdoc an das CERN, an die HU Berlin und zum DESY ging. Seit 2001 ist er Professor an der Uni Heidelberg und am LHCb-Experiment beteiligt. Er ist Sprecher der deutschen LHCb-Gruppen und beschäftigt sich mit der CP-Verletzung in Zerfällen von B_s -Mesonen.

Roger Wolf hat in Heidelberg studiert und bei HERA promoviert. 2006 wechselte er als Postdoc an die Universität Hamburg und ist seither am CMS-Experiment beteiligt. Seit 2011 ist er DFG-Stipendiat am MIT. Er war maßgeblich an der CMS-Messung der Produktion von Top-Quarkpaaren beteiligt. Sein derzeitiges Arbeitsgebiet ist die Suche nach dem Higgs-Boson, wo er auch an der Kombination aller CMS-Ergebnisse mitwirkt.

