

# Großfahndung im Untergrund

Erste Ergebnisse der direkten Suchen nach neuen Teilchen am Large Hadron Collider

Sascha Caron, Sandra Kortner und Peter Schleper

Ein zentrales Motiv für den Bau des LHC war die Suche nach neuen Elementarteilchen und Wechselwirkungen. Dazu zählen insbesondere das Higgs-Boson, der letzte fehlende Baustein des Standardmodells, sowie Teilchen, die von supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells vorhergesagt werden.

Zu den ungeklärten Rätseln der Teilchenphysik gehört die Frage nach dem Ursprung der Masse der Elementarteilchen. Obwohl die mathematische Struktur des Standardmodells eigentlich nur masselose Teilchen vorsieht, haben z. B. die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung, die  $W^+$ -,  $W^-$ - und  $Z^0$ -Bosonen, eine Masse von 80 beziehungsweise 91  $\text{GeV}/c^2$ . Das Standardmodell beruht auf der Hypothese, dass der sog. Higgs-Mechanismus Teilchen ihre Masse verleiht. Dieser Mechanismus sagt außerdem ein neues Teilchen voraus, das Higgs-Boson. Die experimentelle Suche nach diesem entscheidenden fehlenden Baustein im Mosaik des Standardmodells ist zentral für das Forschungsprogramm des LHC.

Das zweite ungeklärte Rätsel ist die Frage, was jenseits des Standardmodells kommt. Bisher beschreibt das Standardmodell alle beobachteten Wechselwirkungen der Elementarteilchen, eine durchaus bemerkenswerte wissenschaftliche Errungenschaft. Von einer fundamentalen Theorie der Natur ist es jedoch noch weit entfernt, denn die Liste seiner unerklärten Eigenschaften ist recht lang: Auffällig ist zunächst seine Struktur mit drei fundamentalen Kräften und mit drei Generationen von Leptonen und Quarks. Weder für diese Struktur noch für die damit verbundenen Zahlenwerte der Naturkonstanten (Massen, Kopplungskonstanten, ...) gibt es im Standardmodell eine Erklärung. Auch ist fraglich, ob diese Theorie bei sehr hohen Energien gültig sein kann, denn hierfür müssten einige Parameter sehr präzise Werte annehmen. Eine solche Feinjustierung – auch als Hierarchieproblem bekannt – gilt vielen Physikern als unnatürlich. Zudem ist es bisher nicht gelungen, das Standardmodell mit der Gravitation in einer gemeinsamen Theorie zu verknüpfen. Eine Erklärung für die Beobachtung Dunkler Materie und Dunkler Energie im Universum fehlt ebenfalls. Diese Mängelliste ließe sich noch fortsetzen.

Aus diesen Gründen wurde in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von Erweiterungen des Standardmodells vorgeschlagen. Der prominenteste

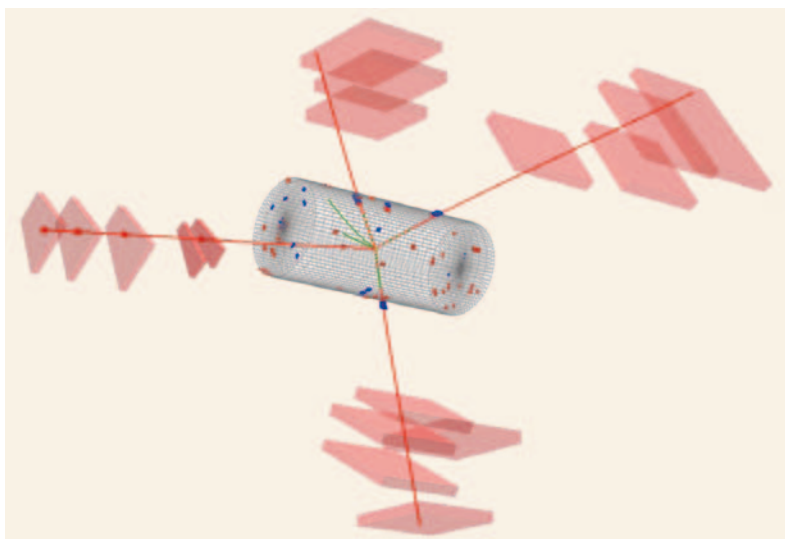


Abb. 1 Hat das CMS-Experiment hier ein Higgs-Boson nachgewiesen? Das Ereignis weist die Signatur des Zerfalls zweier  $Z$ -Bosonen in jeweils ein Paar aus Myon

und Antimyon. Die invariante Masse der vier Myonen (rote Linien) und damit die Masse des möglichen Ausgangsteilchens beträgt hier ca. 125  $\text{GeV}/c^2$ .

Kandidat ist die Supersymmetrie. Im Gegensatz zum Standardmodell, in dem alle Materieteilchen Fermionen mit Spin  $\frac{1}{2}$  sind und Bosonen mit Spin 1 alle Kräfte vermitteln, basiert Supersymmetrie auf dem Postulat einer Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen. Die damit vorhergesagten neuen Teilchen können jedoch viel schwerer als ihre Partner im Standardmodell sein, sodass sie in bisherigen Experimenten nicht zu entdecken waren. Falls das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil ist, würde sich damit auch direkt die Existenz Dunkler Materie erklären lassen.

## KOMPAKT

- Auch wenn das Higgs-Boson bislang nicht entdeckt wurde, zeigen die Ergebnisse von ATLAS und CMS, dass seine Masse nur noch zwischen 115 und 130  $\text{GeV}/c^2$  liegen kann.
- Die Suche nach supersymmetrischen Teilchen war bislang zwar nicht erfolgreich, für die einfachsten supersymmetrischen Modelle lassen sich aber bereits Massen unter ca. 1  $\text{TeV}/c^2$  für Gluinos und Squarks ausschließen.
- Für die nächsten Jahre verspricht der LHC einen entscheidenden Beitrag für Supersymmetrie an der TeV-Skala und zur Natur der Dunklen Materie.

Dr. Sascha Caron, Experimental High Energy Physics, Radboud University Nijmegen und NIKHEF, Heyendaalseweg 135, NL 6525 AJ Nijmegen, Dr. Sandra Kortner, Max-Planck-Institut für Physik, Föhringer Ring 6, 80805 München; Prof. Dr. Peter Schleper, Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg

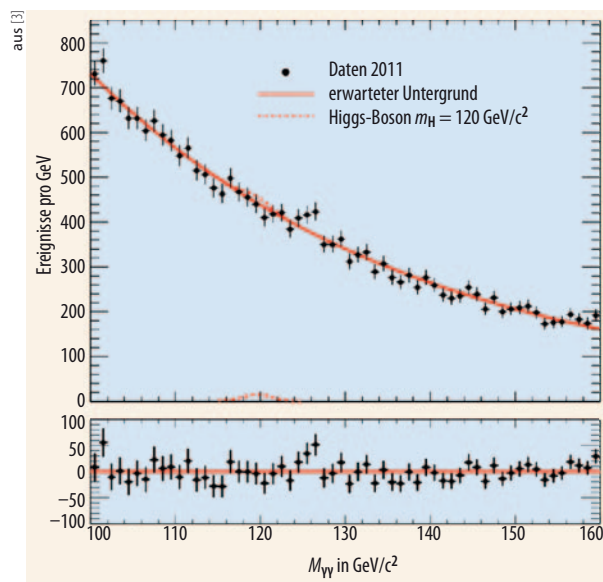


Abb. 2 Ergebnisse des ATLAS-Experiments zur Massenverteilung von Ereignissen mit zwei Photonen, im Vergleich zum erwarteten Untergrund. Zur Illustration zeigt die rot-punktierte Linie das simulierte Signal eines Higgs-Teilchens mit  $M_H = 120 \text{ GeV}/c^2$ . Bei dieser Masse lassen sich die Daten durch den erwarteten Untergrund beschreiben. Der Bereich um  $125 \text{ GeV}/c^2$  wird im Text diskutiert.

## Durchbruch beim Higgs-Boson?

Die Suche nach dem Higgs-Boson wird dadurch besonders spannend, dass sich seine Masse nicht vorhersagen lässt. Allerdings haben frühere Experimente am CERN und am Fermilab bereits Massen unterhalb  $114 \text{ GeV}/c^2$  sowie zwischen  $156$  und  $177 \text{ GeV}/c^2$  ausgeschlossen. Präzisionsmessungen in Verbindung mit Rechnungen zeigen außerdem, dass noch höhere Massen im Standardmodell eher unwahrscheinlich sind (siehe Artikel auf S. 51). Der LHC erlaubt es zum ersten Mal, den gesamten erlaubten Massenbereich bis zu etwa  $600 \text{ GeV}/c^2$  zu erforschen und dadurch die Theorie zu bestätigen oder zu widerlegen – ein anspruchsvolles und fesselndes Unterfangen.

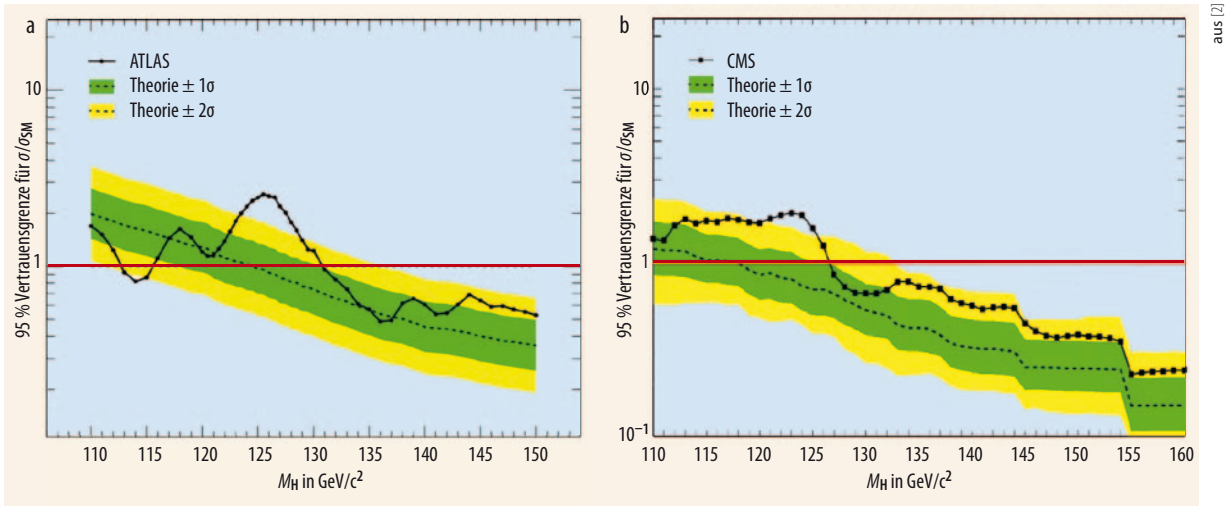
Das Standardmodell sagt für die Produktion des Higgs-Bosons in der Kollision zweier Protonen am LHC einen äußerst geringen Wirkungsquerschnitt vorher: Nur in einer von etwa hundert Milliarden Kollisionen, die innerhalb einer Minute stattfinden, würde ein Higgs-Boson entstehen. Das Teilchen zerfällt innerhalb kürzester Zeit und lässt sich daher nur über seine Zerfallsprodukte identifizieren. Je nach tatsächlicher Masse des Higgs-Bosons dominieren verschiedene Zerfallskanäle. Eine sehr klare Signatur in den Detektoren liefert zum Beispiel der sog. goldene Higgs-Zerfall in zwei Z-Bosonen, die sofort in jeweils ein Myon-Antimyon-Paar zerfallen ( $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ , Abb. 1) [1]. Allerdings kann der gleiche Endzustand auch durch andere konkurrierende Untergrundprozesse entstehen, beispielsweise durch die direkte Produktion zweier Z-Bosonen aus Quarks ( $q\bar{q} \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ ).

Im Allgemeinen gibt es zu jedem Zerfallskanal des Higgs-Teilchens mehrere Untergrundprozesse mit ähnlicher Signatur und weit höherer Rate. Ausgeklügelte Algorithmen und Auswahlkriterien der Datenanalyse machen es möglich, die meisten Untergrundeignisse herauszufiltern. Enorme Datenmengen sind notwendig, damit nach diesen strengen Auswahlver-

fahren noch ausreichend viele potenzielle Ereignisse übrig bleiben, um das Higgs-Teilchen ausfindig machen zu können.

Um den gesamten Bereich der möglichen Massen des Higgs-Bosons zu erfassen, wird die Suche in allen möglichen Zerfallskanälen durchgeführt. Für ein relativ schweres Higgs-Boson mit einer Masse  $M_H$  oberhalb von etwa  $2 M_Z = 180 \text{ GeV}/c^2$  eignet sich wegen seiner klaren Signatur der schon erwähnte Zerfall in zwei Z-Bosonen am besten. Auch leichtere Higgs-Bosonen können aufgrund der Unschärferelation so zerfallen, allerdings nimmt die Wahrscheinlichkeit dafür sehr schnell ab. Zwischen  $130$  und  $200 \text{ GeV}/c^2$  ist stattdessen der Zerfall in zwei W-Bosonen am vielversprechendsten. Für eine Masse unterhalb von etwa  $130 \text{ GeV}/c^2$  ist die Suche am schwierigsten: Das Higgs-Boson zerfällt dann ganz überwiegend in Paare leichter Teilchen, z. B. b-Quarks und  $\tau$ -Leptonen. Der Untergrund ist jedoch besonders hoch, sodass sehr seltene Zerfälle wie  $H \rightarrow \gamma\gamma$  wichtig werden. Eine Kombination aller Zerfallskanäle ist daher in diesem Massenbereich äußerst wichtig.

Im Februar 2012 haben die Experimente ATLAS und CMS die neuesten Ergebnisse zur Higgs-Suche anhand der 2011 aufgezeichneten Daten publik gemacht [2]. Wie schwierig die Analysen sind, zeigt beispielhaft die Suche nach dem Higgs-Zerfall in zwei Photonen (Abb. 2). Beide Experimente schließen mit einer Vertrauensgrenze von mindestens 95 % ein Higgs-Boson mit den vom Standardmodell vorhergesagten Eigenschaften für Massen  $M_H > 127 \text{ GeV}/c^2$  (CMS) bzw.  $131 \text{ GeV}/c^2$  (ATLAS) aus (Abb. 3). Zusätzlich schließt das ATLAS-Experiment noch einen kleinen Massenbereich unterhalb von  $115 \text{ GeV}/c^2$  aus. Damit verbleibt dem Higgs-Teilchen im Rahmen des Standardmodells nur noch der Bereich zwischen  $115$  und  $127 \text{ GeV}/c^2$ ! Beide Experimente beobachten darin derzeit einen kleinen Überschuss an Ereignissen im Vergleich zum erwarteten Untergrund. Für sich genommen ist der Effekt klein, aber die Tatsache, dass beide Experimente



**Abb. 3** Kombiniert man statistisch alle Zerfallskanäle des Higgs-Bosons, so können sowohl ATLAS (a) als auch CMS (b) weite Bereiche der Higgs-Masse  $M_H$  ausschließen. Bei einem Verhältnis der aufgetragenen Größe kleiner eins ist ein Higgs-Boson der entsprechenden Masse und mit den vom Standardmodell vorhergesagten Eigenschaften mit einer Vertrauensgrenze von 95 % ausgeschlossen. Dies ist insbesondere bei

großen Massen, auch jenseits des gezeigten Bereichs, der Fall. Die schwarzen Punkte zeigen die Messungen, die schwarzgestrichelte Linie die theoretische Erwartung, falls das Higgs-Boson bei dieser Masse nicht existiert, mit einer statistischen Sensitivität von einer (grünes Band) bzw. zwei Standardabweichungen (gelb). Demnach kann  $M_H$  nur noch zwischen 115 und 130  $\text{GeV}/c^2$  liegen.

diesen Überschuss in mehreren Zerfallskanälen und bei der gleichen Masse von ca. 125  $\text{GeV}/c^2$  beobachten, stimmt zuversichtlich. Daher sind die Aussichten sehr gut, dass es bereits 2012 gelingen wird, das Higgs-Teilchen mit den im Standardmodell vorhergesagten Eigenschaften zu beobachten oder auszuschließen – vorausgesetzt natürlich, dass Beschleuniger und Experimente weiterhin so hervorragend funktionieren.

Natürlich wäre eine Entdeckung des Higgs-Bosons ein Durchbruch für die Teilchenphysik. Längerfristig entscheidend wird es aber sein, die Verzweungsverhältnisse und damit die Kopplungskonstanten des Higgs-Teilchens an Fermionen und Bosonen zu messen, denn diese sollten direkt proportional zu deren Massen sein – dies ist zumindest die zentrale Vorhersage des Standardmodells. Viele weiterführende Theorien, insbesondere auch die Supersymmetrie, sagen hingegen mehrere Higgs-Teilchen mit unterschiedlichen Massen und Kopplungskonstanten voraus. Die Suche hiernach wird noch sehr viel größere Datenmengen erfordern und auch von der für 2015 avisierten höheren Schwerpunktsenergie profitieren.

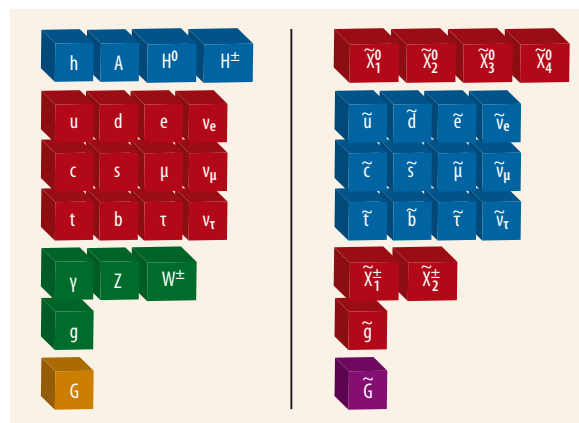
Einige Argumente sprechen dafür, dass diese neuen Teilchen nicht zu schwer sind, sondern Massen im Bereich von  $\text{TeV}/c^2$  haben sollten. Supersymmetrie würde dann das Problem der Feinjustierung der Higgs-Parameter des Standardmodells elegant lösen. Relativ leichte supersymmetrische Teilchen würden auch auf eine Vereinheitlichung der drei Kräfte des Standardmodells bei hohen Energien hinweisen.

Frühere Experimente haben keine Hinweise auf supersymmetrische Teilchen gefunden, sodass sie auf jeden Fall schwerer sein müssen als ihre uns bekannten Partner im Standardmodell. Interessant ist aber die Tatsache, dass supersymmetrische Modelle mindestens fünf Higgs-Bosonen vorhersagen, wobei die Masse des leichtesten kleiner sein muss als ungefähr 135  $\text{GeV}/c^2$ . Die bisherigen Ergebnisse zur Suche nach dem Higgs-Boson sind damit kompatibel!

Viele supersymmetrische Modelle sagen die Erhaltung einer neuen Quantenzahl vorher: Diese R-Parität

### Die Suche nach Susy

Supersymmetrie (kurz: Susy) ist der populärste Kandidat für Physik jenseits des Standardmodells. Aufgrund der postulierten Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen muss es zu jedem fundamentalen Teilchen ein Partnerteilchen geben, das sich nur in der Masse und im Spin unterscheidet (Abb. 4). Beispielsweise hätte jedes Quark des Standardmodells ein supersymmetrisches Partnerteilchen, Squark genannt. Dieses wäre ein Boson mit Spin 0, würde aber wie das Quark auch an der starken und elektroschwachen Wechselwirkung teilhaben.



**Abb. 4** Die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells sagt zu den jedem „Standard-Teilchen“ (links) einen supersymmetrischen Partner vorher (rechts). Susy-Modelle haben mindestens fünf Higgs-Teilchen (h, A,  $H^0$ ,  $H^+$  und  $H^-$ ).



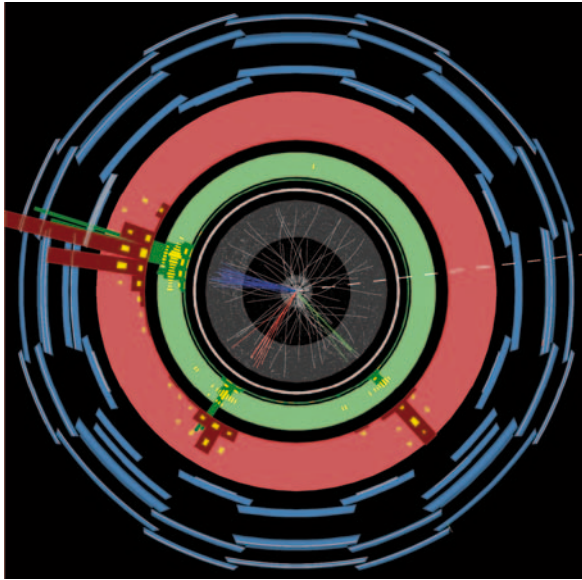


Abb. 5 Bei diesem Ereignis des ATLAS-Detektors sind nach der Kollision der Protonen im Zentrum u. a. drei Jets entstanden (gelb: Signale in den Kalorimetern), deren Impulse in der Ebene sich offensichtlich nicht zu null addieren. Die gestrichelte weiße Linie zeigt den „fehlenden Transversalimpuls“.

unterscheidet zwischen den Teilchen des Standardmodells und ihren Partnerteilchen. In diesen Modellen entstehen supersymmetrische Teilchen immer paarweise, und diese können dann jeweils nur in ein weiteres supersymmetrisches Teilchen zerfallen. Das leichteste supersymmetrische Teilchen (Lightest Supersymmetric Particle, LSP) wäre somit stabil und, falls ungeladen, ein idealer Kandidat für Dunkle Materie.

Diese Gründe machen die Suche nach supersymmetrischen Teilchen beim LHC so wichtig. Da die neuen Teilchen den bekannten Wechselwirkungen unterliegen, lassen sich zum Beispiel die Partner der Quarks und Gluonen – genannt Squarks und Gluinos – aufgrund der starken Wechselwirkung mit hohen Raten erzeugen. Diese Teilchen zerfallen dann zum einen in bekannte Teilchen des Standardmodells, hauptsächlich in Quarks und Gluonen, die wiederum Teilchenschauer aus Hadronen („Jets“) im Detektor erzeugen, sowie zum anderen in leichtere supersymmetrische Teilchen und schließlich in LSPs. Da diese stabil sind und nur durch die schwache Wechselwirkung mit Materie reagieren, lassen sie sich im Experiment nicht direkt nachweisen. Stattdessen kann man aus fehlendem Impuls transversal zum Strahlrohr auf die Produktion von LSPs schließen – ähnlich wie Wolfgang Pauli 1930 das Neutrino einführte, um den  $\beta$ -Zerfall zu erklären. Fehlender Transversalimpuls ist daher eine charakteristische Signatur für Supersymmetrie (Abb. 5). Bekannte Prozesse des Standardmodells, bei denen W- oder Z-Bosonen in Neutrinos zerfallen, führen jedoch zu ähnlichen Ereignissen.

Die sensitivsten Suchen bei ATLAS und CMS verlangen Ereignisse mit mehreren hochenergetischen Jets (Abb. 5). Da konkrete supersymmetrische Modelle aber sehr unterschiedliche Zerfälle vorhersagen, wird parallel nach supersymmetrischen Ereignissen in einer

Vielzahl von Endzuständen gesucht, die beispielsweise Photonen, Elektronen, Myonen oder  $\tau$ -Leptonen beinhalten können. Auch hier können die Ergebnisse für verschiedene Zerfallskanäle kombiniert werden. Zusammengefasst besteht bei der Suche nach Supersymmetrie die Hauptarbeit darin, die Anzahl der aus bekannten Prozessen erwarteten Ereignisse präzise vorherzusagen und die Ereigniserektionen zum Herausfiltern möglicher Signale intelligent festzulegen.

Bisher war die Suche nach Supersymmetrie zwar nicht erfolgreich, für die einfachsten supersymmetrischen Modelle erlauben es die Ergebnisse aber, Massen der Gluinos und Squarks unterhalb von ca.  $1 \text{ TeV}/c^2$  auszuschließen. Dies schränkt den interessanten Parameterbereich supersymmetrischer Modelle erheblich ein. Allerdings hängen diese Ergebnisse sehr von konkreten Modellparametern ab, sodass Ausschlussgrenzen meist in einem eingeschränkten minimalen supersymmetrischen Modell gezeigt werden, dem CMSSM („constrained minimal supersymmetric model“). Dieses enthält Randbedingungen einer Großen Vereinigungstheorie (GUT), die bei großen Energien zu einer gemeinsamen Masse  $m_0$  bzw.  $m_{1/2}$  für alle Bosonen bzw. Fermionen führt. Das CMS-Experiment liefert Ausschlussgrenzen für das CMSSM (Abb. 6) [4], die ATLAS-Kollaboration hat sehr ähnliche Resultate veröffentlicht [5–7]. Auch in diesem supersymmetrischen Modell werden bereits Squark- und Gluino-Massen bei der LHC-Energie bis zu etwa einem  $\text{TeV}/c^2$  ausgeschlossen. Die LHC-Experimente haben damit einen weit größeren Bereich ausgeschlossen als alle bisherigen Experimente. Erheblich größere Datenmengen und vor allem die höhere Schwerpunktsenergie von 14 TeV sind notwendig für allgemeingültigere Aussagen.

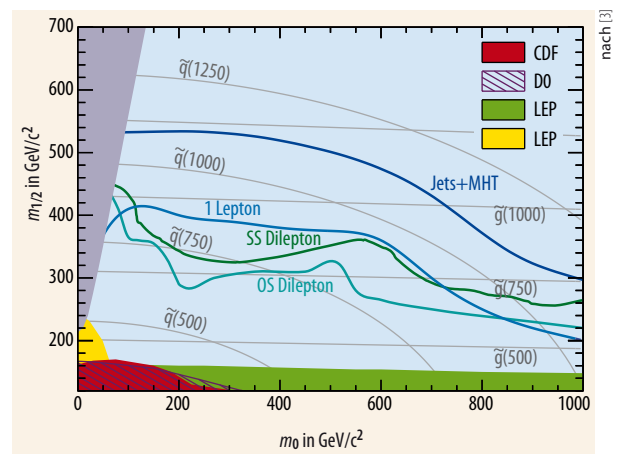


Abb. 6 Die bisher erfolglose Suche nach Supersymmetrie erlaubt es, verschiedene Massengebiete an der GUT-Skala für die supersymmetrischen Bosonen ( $m_0$ ) bzw. Fermionen ( $m_{1/2}$ ) auszuschließen. Gezeigt sind die Resultate verschiedener Suchen bei CMS sowie bisherige Ergebnisse am Tevatron (CDF, DO) und LEP. „Jets+MET“ bezeichnet z. B. die Suche nach Ereignissen mit Jets und fehlendem Transversalimpuls, „1 Lepton“ sowie „Dilepton“ die Suchen nach Leptonen und fehlendem Transversalimpuls. In diesem Modell (CMSSM) entspricht z. B. der Punkt bei  $m_0 = 500 \text{ GeV}/c^2$  und  $m_{1/2} = 430 \text{ GeV}/c^2$  einer Squark- und Gluino-Masse von jeweils  $1000 \text{ GeV}/c^2$ . Ausgeschlossen ist jeweils der Bereich unterhalb der Linien.

Die ersten LHC-Analysen haben den Parameter- raum, in dem die Supersymmetrie eine gute Lösung für das Hierarchieproblem und die Dunkle Materie liefert, signifikant verkleinert. Durch die Suchen nach Squarks und Gluinos sowie einem leichten Higgs- Boson wird der LHC in den nächsten Jahren einen entscheidenden Beitrag zur Supersymmetrie an der TeV-Skala und zur Natur der Dunklen Materie geben können. Damit ist die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells aber keineswegs erschöpft. Andere vorgeschlagene Erweiterungen des Standardmodells sagen beispielsweise zusätzliche kleinste räumliche Dimensionen oder eine neue starke Wechselwirkung vorher. Auch diese Theorien gehen mit neuen Teilchen einher. Für neue schwere Partner der W-Bosonen haben die Experimente Massen unter  $2,2 \text{ TeV}/c^2$  ausgeschlossen [8], und Quarks einer neuen, vierten Generation müssten schwerer als  $475 \text{ GeV}/c^2$  sein [9]. Experimentell wird also nach vielen verschiedenen Signaturen neuer Physik gesucht, und die Ergebnisse hierzu werden mit höherer Schwerpunktsenergie und größeren Datenmengen immer sensitiver werden.

#### Literatur

- [1] CMS Collaboration, CMS PAS HIG-11-025  
 [2] ATLAS Collaboration, arXiv: 1202.1408v2, erscheint in Phys. Lett. B; CMS Collaboration, arXiv: 1202.1488, erscheint in Phys. Lett. B  
 [3] ATLAS Collaboration, arXiv: 1202.1414, erscheint in Phys. Rev. Lett.

- [4] CMS Collaboration, CMS PAS SUS-11-004  
 [5] ATLAS Collaboration, arXiv:1109.6572, erscheint in Phys. Lett. B  
 [6] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. **B701**, 186 (2011)  
 [7] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. Lett. **106**, 131802 (2011)  
 [8] CMS Collaboration, CMS PAS EXO-11-054, ATLAS Collaboration, Phys. Lett. **B705**, 28 (2011)  
 [9] CMS Collaboration, CMS PAS EXO-11-024  
 [10] CMS Collaboration, Phys. Rev. Lett. **107**, 221804 (2011)  
 [11] CMS Collaboration, Phys. Lett. **B698**, 196 (2011)

#### DIE AUTOREN

**Sascha Caron** ist seit vergangenem Jahr Tenure Track Assistant Professor an der Radboud Universität Nijmegen und am NIKHEF Institut in Amsterdam. Nach der Promotion an der RWTH Aachen war er Marie Curie Fellow am NIKHEF und Assistent an der Universität Freiburg, wo er sich 2010 habilitierte. In den letzten beiden Jahren hat er bei ATLAS die SUSY-Suchen in Endzuständen mit fehlendem Transversalimpuls geleitet.



**Sandra Kortner** hat in Zagreb studiert und arbeitet seit 2001 als Mitglied der ATLAS-Arbeitsgruppe am MPI für Physik in München. Seit 2009 leitet sie dort eine Nachwuchsgruppe im Rahmen des MPG-Minerva-Programms. Sie widmet sich seit mehreren Jahren der Suche nach dem Higgs-Boson und koordiniert seit 2010 die entsprechende Gruppe bei ATLAS.

**Peter Schlepfer** hat an der RWTH Aachen promoviert und sich 1997 an der Uni Heidelberg habilitiert. Nach Postdoc-Aufenthalten am CERN und bei DESY folgte er 2003 einem Ruf auf eine Professur in Hamburg. Er ist seit 2009 Sprecher der deutschen Gruppen am CMS-Experiment und beschäftigt sich hauptsächlich mit der Suche nach Physik jenseits des Standardmodells, der starken Wechselwirkung sowie der Top-Physik.

