

# Teilchenjäger auf Fährten suche

Mit dem Nachweis des Higgs-Teilchens gelang am Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider ein großer Wurf. Andere erwartete oder unerwartete Entdeckungen, mit denen die Physik das Erscheinungsbild unserer Welt erklären wollte, blieben dagegen aus. Nun suchen auch **Hermann Nicolai**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik** in Potsdam, und **Siegfried Bethke**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Physik** in München, neue Perspektiven für die Teilchenphysik.

Unfassbar: Mit einer freien Illustration versucht das Cern, das Higgs-Boson vorstellbar zu machen. So bedeutsam dessen Entdeckung war, so schwierig ist es aber auch, ein solches Elementarteilchen zu visualisieren.

TEXT ROLAND WENGENMAYR

Im Jahr 2012 verkündete das Europäische Teilchenforschungszentrum Cern eine Sensation mit Ansage: Am stärksten Teilchenbeschleuniger der Welt, dem Large Hadron Collider (LHC), wurde das Higgs-Teilchen aufgespürt. Endlich, denn es bewies den Mechanismus, der den Elementarteilchen Masse gibt und bereits in den 1960er-Jahren unter anderem von Peter Higgs, François Englert und Robert Brout beschrieben worden war. Ohne diesen Mechanismus gäbe es weder uns noch das uns bekannte Universum. Für seine theoretische Beschreibung erhielten Higgs und Englert 2013 den Nobelpreis für Physik – Brout war zwei Jahre zuvor gestorben. Das Higgs-Boson lieferte außerdem den letzten fehlenden Baustein des sogenannten Standardmodells der Teilchenphysik.

Doch seither herrscht Funkstille aus Genf, zumindest was weitere große Entdeckungen am LHC betrifft. Dabei hatten Vorhersagen aus der theoretischen Physik hohe Erwartungen an die Teilchenkollisionen im knapp 27 Kilometer langen Beschleunigerring geschürt. Es ging um eine Physik jenseits des Standardmodells und damit auch um buchstäblich existenzielle Zusammenhänge.

Da ist zum Beispiel das Problem mit der Antimaterie. Eigentlich hätte sie nach dem Urknall in derselben Menge entstehen sollen wie Materie – und beide hätten sich gegenseitig gleich wieder vernichten müssen. So kam es zum Glück nicht. Denn eine solche perfekt symmetrische Welt hätte ein Universum ohne Galaxien, Sterne und Planeten produziert, angefüllt nur vom Lichtecho der vollständigen Vernichtung.

Da Astronomen im Universum bislang keine Antimaterie gefunden haben, hat sehr wahrscheinlich ein winziger, unbekannter Webfehler in der Symmetrie zwischen Antimaterie und Materie den gar nicht so kleinen Rest an Materie übrig gelassen, dem wir unsere Existenz verdanken. Nach einem sol-

chen Sprung im Spiegelbild der Antimaterie fahndet die Kern- und Teilchenphysik derzeit intensiv, auch am LHC.

Nicht weniger mysteriös und für unser Universum genauso bedeutend sind die Dunkle Materie und die Dunkle Energie. Auf beide sollte der LHC ebenfalls Hinweise bringen. Die Dunkle Materie wechselwirkt weder mit Licht noch mit der bekannten Materie, macht sich aber über die Gravitation bemerkbar. Nur mit ihrer Hilfe lassen sich die hohen Geschwindigkeiten von Sternen an den Rändern von Galaxien erklären – demnach muss es von ihr mehr als fünfmal so viel geben wie von der sichtbaren Materie. Die Gravitation der sichtbaren Materie alleine entwickelt dafür nicht genügend Beschleunigungskräfte. Ebenso schwer fassbar ist die Dunkle Energie, die das Universum nach heutigem Wissen beschleunigt aufbläht und rund drei Viertel der Energie im Universum ausmacht. Worum es sich dabei handeln könnte, ist bislang noch völlig schleierhaft.

Bei der Suche nach Erklärungen für die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie oder nach der Natur von Dunkler Materie und Dunkler Energie gab es am LHC kaum Fortschritte. Von einer Krise der Teilchenphysik wird aber vor allem gemunkelt, weil die Experimente am Cern bisher bei der Lösung eines weiteren Problems der Physik nicht geholfen haben: Seit vielen Jahrzehnten versuchen schlaue Köpfe, die beiden Theoriesäulen der Physik, die Quantenmechanik und die allgemeine Relativitätstheorie, zu einer übergeordneten Theorie zu vereinigen. Dabei wollen Physiker auch die vier Grundkräfte, die das physikalische Geschehen in unserer Welt bestimmen, auf eine gemeinsame Kraft, wie es sie ihren heutigen Theorien zufolge beim Urknall gegeben haben muss, zurückführen.

Die Quantenmechanik und das auf ihr basierende Standardmodell der Teilchenphysik beschreiben nämlich aus-

schließlich den Mikrokosmos der Elementarteilchen und die drei Kräfte, die diesen regieren: starke und schwache Kernkraft sowie die elektromagnetische Kraft. Die Gravitation als vierte Kraft, die in das Regime der allgemeinen Relativitätstheorie fällt, ist hingegen um gewaltige 40 Größenordnungen schwächer; dieses massive Missverhältnis wird Hierarchieproblem genannt. Die Gravitation entfaltet ihre Wirkung erst über große Distanzen und dominiert damit alle Vorgänge im Kosmos, spielt aber in der Mikrowelt keine Rolle.

Beide Theorien für sich genommen sind durch Experimente extrem gut belegt. Im Bemühen, sie zu vereinigen, gibt es verschiedene Ansätze, und einige davon prognostizierten Entdeckun-

gen am LHC, die bislang ausgeblieben sind. Dazu zählen etwa schwarze Mini-Löcher, aufgerollte Extradimensionen und Supersymmetrien.

### MÜSSEN PHYSIKALISCHE THEORIEN NATÜRLICH SEIN?

Die Existenz der Phänomene haben manche Schulen der Stringtheorie berechnet – eines der Forschungsgebiete, die sich um eine funktionierende Quantengravitation bemühen. Demnach sei die Welt im Aller kleinsten aus fadenartigen Strings konstruiert, in denen weitere Dimensionen der Raumzeit aufgerollt sind. Die in Raumzeit-Wraps eingerollten Extradimensionen hätten nach einigen Vorhersagen groß genug sein müs-

sen, um sich am LHC zu zeigen. Danach hätten dort auch supersymmetrische (Susy-)Teilchen entstehen sollen, die zu einer supersymmetrischen Spiegelwelt gehören und mit der Stringtheorie-Variante der Superstrings verbunden sind. Da diese Vorhersagen fehlgingen, sehen manche Fachleute das Problem nicht bei den Experimenten am LHC, sondern bei den Theorien, die bestimmte Messergebnisse vorhergesagt haben.

Bei der Entwicklung neuer Theorien orientieren sich Wissenschaftler auch an Kriterien wie Symmetrie, Natürlichkeit und Eleganz der mathematischen Konstruktion. Ob sie sich damit veranrannt haben, fragt etwa Sabine Hossenfelder in ihrem Buch *Das hässliche Universum*. Die Wissenschaftlerin forscht

Suchmaschine für neue Teilchen: Der CMS-Detektor wiegt 14000 Tonnen und hat 75 Millionen individuelle Messkanäle, um Teilchen nachzuweisen. Gemeinsam mit dem Atlas-Detektor spürte er das Higgs-Boson auf, er sollte aber auch Susy-Teilchen nachweisen, was bislang nicht gelungen ist.

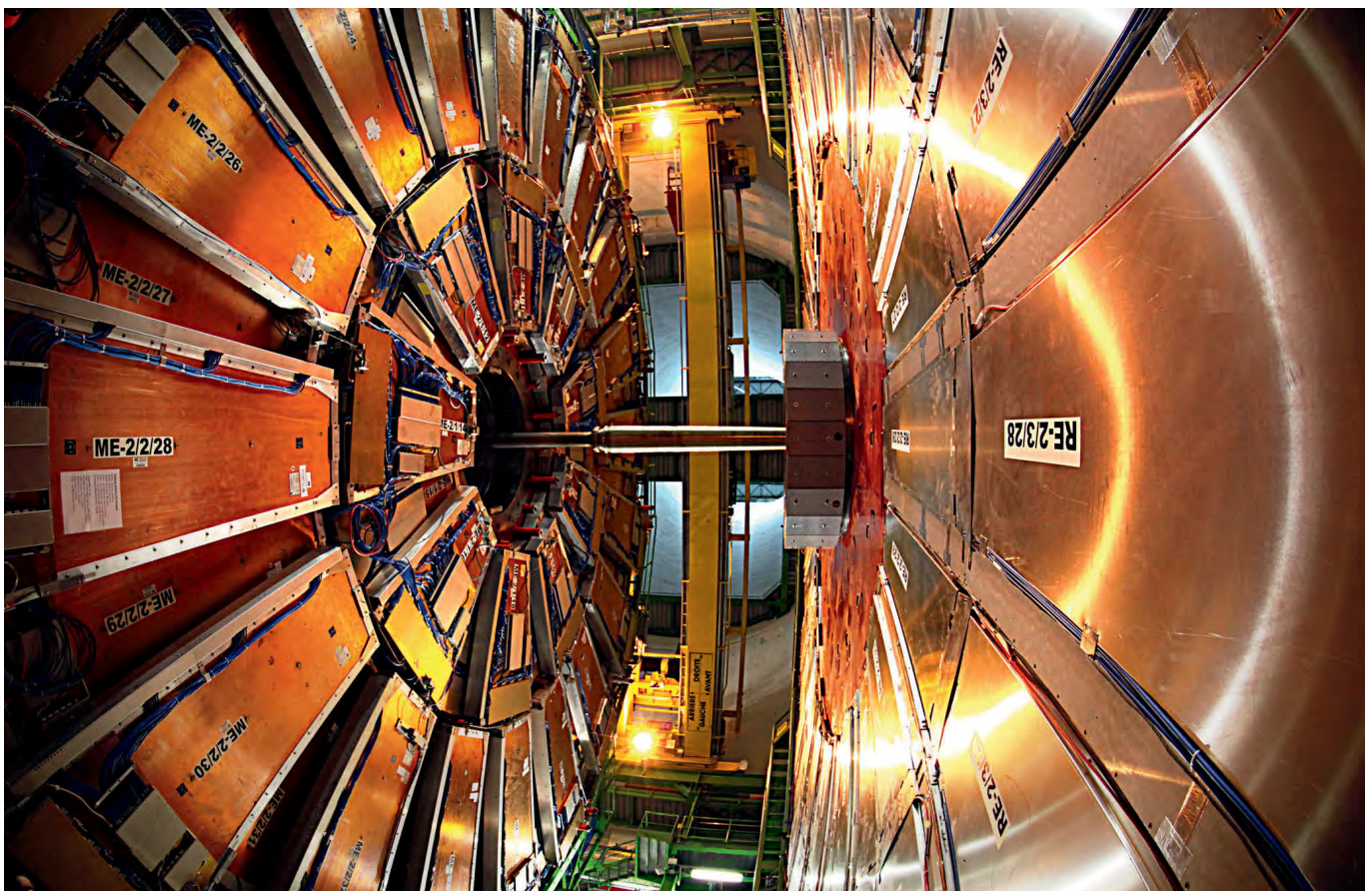


Foto: Michael Hoch/CERN

derzeit am Frankfurt Institute for Advanced Studies zur Quantengravitation.

Wenn sie ihre Skepsis etwa gegenüber der Natürlichkeit erklärt, beginnt sie mit der Frage, warum Theoretiker das Auftauchen von supersymmetrischen Teilchen oder aufgerollten Extradimensionen am LHC vorhergesagt haben. „Die Leute haben gedacht, das Standardmodell könne noch nicht vollständig sein“, sagt Sabine Hossenfelder: „Und der Grund ist, dass das Standardmodell nicht ‚natürlich‘ sein kann in dem Sinne des Wortes, wie es die Hochenergiephysiker benutzen.“

Seit den frühen 1990er-Jahren hat sich nach Hossenfelders Analyse in der theoretischen Teilchenphysik unreflektiert verfestigt, dass Theorien das abstrakte Kriterium der Natürlichkeit erfüllen müssen. Stark vereinfacht gesprochen, verlangt diese Bedingung, dass die Massen, aber auch andere Eigenschaften der Teilchen, die für die Quantengravitation relevant sind, nicht zu stark voneinander abweichen dürfen.

## AN DER GRENZE DER PHYSIK FEHLEN ERFAHRUNGEN

So würden wir etwa „eine Millionen Kilometer hohe Sonnenblume für unnatürlich halten“, sagt die Physikerin. Hingegen ist für eine Sonnenblume eine Höhe in der Größenordnung von grob einem Meter natürlich; das lehrt uns unsere Erfahrung. „Im Standardmodell sind alle Zahlen ‚natürlich‘ auf diese Art und Weise“, erklärt Hossenfelder, „bis auf die Masse des Higgs-Bosons.“ Sie ist in der mathematischen Darstellung, mit der die theoretische Teilchenphysik arbeitet, um 15 Zehnerpotenzen zu klein und somit für viele Theoretiker unnatürlich.

Das Problem an diesem Begriff der Natürlichkeit ist laut Sabine Hossenfelder der Mangel an Erfahrung, wenn man sich auf Neuland der Physik wagt. Beim Anblick eines für uns neuen Sonnenblumenfelds lehrt uns die Erfahrung, dass es extrem große Blumen nicht geben kann. Doch an den Grenzen der heutigen Physik fehlen solche Erfahrungen. Nach Hossenfelder und

einigen anderen Theoretikern versagt daher Natürlichkeit als ästhetisches Kriterium – zumal die Mathematik, das Werkzeug der Theorie, keine logische Begründung für ein solches ästhetisches Kriterium liefert.

Als einem weiteren Leitstern in der Arbeit an neuen Theorien folgen Forscher dem Prinzip der Symmetrie, bislang mit großem Erfolg. In der uns sinnlich zugänglichen Welt tauchen Symmetrien immer wieder auf – ebenso wie kleine Abweichungen. Das belegen schon unsere beiden Gesichtshälften. In der Physik kommt man mit einer aus dem Alltag geprägten Bedeutung von Symmetrie oft nicht weit. So führten Symmetrieüberlegungen etwa den britischen Theoretiker Paul Dirac dazu, die Existenz von Antimaterie vorherzusagen.

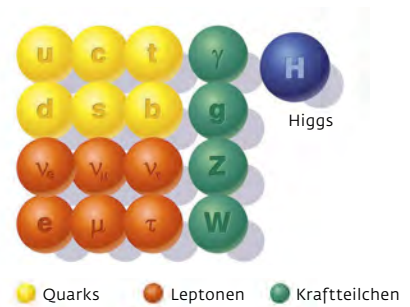
Auch bei der Symmetrie sieht Sabine Hossenfelder die Gefahr, dass ein Schönheitsbegriff, der sich aus den guten Erfahrungen damit durchgesetzt hat, in der Grundlagengravitation ebenfalls in die Irre führen könnte. „Vielleicht ist das Universum nicht so schön, wie es die Teilchenphysiker gerne hätten“, sagt sie.

Mit ihrer Kritik stößt Hossenfelder in der Teilchenphysik auf unterschiedliche Resonanz. Manche halten sie für destruktiv, andere reagieren positiv. Entsprechend umstritten sind Mutmaßungen über eine Krise der Teilchenphysik.

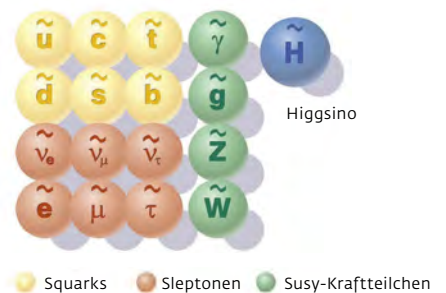
„Eine Krise sehe ich überhaupt nicht, diese Einschätzung betrifft nur ganz bestimmte theoretische Ansätze“, sagt Hermann Nicolai, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam. „Zum einen ist das Cern-Experiment ein voller Erfolg, weil es das Standardmodell noch einmal hervorragend bestätigt. Zum anderen sollen solche Experimente ja gerade aus dem Wildwuchs an Theorien alle falschen Ansätze ausschneiden, und auch das hat der LHC geleistet.“

Nicolai selbst hat nie an Susy-Teilchen geglaubt, obwohl er mit der Entwicklungsgeschichte der Supersymmetrie bestens vertraut ist. Er hat bei Julius Wess, einem der Pioniere dieses Forschungsfelds, promoviert. Hermann Nicolai erklärt, Hauptmotivation für die

### Standard-Teilchen



### Susy-Teilchen

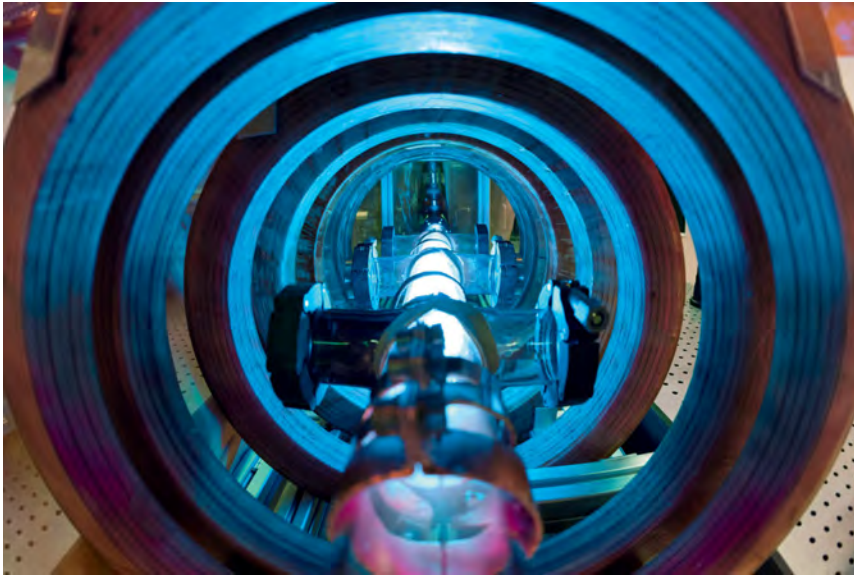


Vorgespiegelte Symmetrie: Susy-Teilchen sollten manchen Theorien zufolge den Zoo der Standard-Elementarteilchen ergänzen. Da sie in Experimenten bislang nicht gefunden wurden, halten immer mehr Physiker sie für Illusion.

Supersymmetrie sei ursprünglich gewesen, dass sie innere Symmetrien der Teilchenphysik mit Symmetrien der Raumzeit zusammenführen sollte. Damit sollte ein Schritt hin zur Vereinigung der allgemeinen Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zur Quantengravitation gelingen.

„Gerade das ursprüngliche Motiv einer Zusammenführung von Symmetrien beider großer Theorien leisteten aber jene neueren Theorien nicht, die eine Entdeckung von Susy-Teilchen am LHC vorhergesagt haben“, sagt Nicolai. Es sei schnell klar gewesen, dass eine solche naive Anwendung der Supersymmetrie im Widerspruch zu den Beobachtungen stehen würde.

„Erst Anfang der 1980er-Jahre kam die Idee auf, dass die Supersymmetrie das Hierarchieproblem lösen sollte“, so Nicolai. Dieses theoretische Konstrukt sollte also die Erklärungslücke schließen, die sich unter anderem aus dem riesigen Größenunterschied zwischen der Gravitation und den drei anderen Grundkräften ergibt. „Aber der Preis war hoch.“ Denn diese einfachste Va-



Szenario künftiger Kollisionsexperimente: Beschleuniger, in denen Teilchen wie hier am Cern auf einer Plasmawelle reiten, könnten viel höhere Energien erreichen als herkömmliche Geräte derselben Größe. Das dürfte neue physikalische Einblicke ermöglichen.

riante der Supersymmetrie verlangt zu jedem Elementarteilchen des Standardmodells einen supersymmetrischen Partner mit nahezu identischen Eigenschaften.

„Wenn diese Idee gestimmt hätte, dann hätte man schon am LEP-Beschleuniger Anzeichen dafür sehen müssen“, sagt der Max-Planck-Wissenschaftler. Der Large Electron-Positron Collider (LEP) war der Vorgänger des LHC im Genfer Ringtunnel. „Die Wahrheit ist wohl ganz schlicht und einfach, dass da nicht viel mehr ist als das Standardmodell.“

Nicolai betont allerdings, dass die Supersymmetrie und die darüber hinausgehenden Ansätze durchaus nicht am Ende sind, auch wenn es möglicherweise keine Susy-Teilchen gibt. Generell bleibt Hermann Nicolai überzeugt davon, dass Symmetrieprinzipien ein wesentlicher Faktor sind, wenn es um die Entwicklung einer Quantengravitation und deren Vereinigung mit dem Standardmodell geht. Die gegenwärtige Situation zeige nur, „dass die Natur weit aus raffinierter ist, als sich das viele prominente Kollegen gedacht haben“. Und der Forscher betont: „Deshalb sehe ich in den LHC-Ergebnissen vor allem eine große Herausforderung für die Theorie: nämlich das Standardmodell – so wie es ist – aus einem fundamentalen Ansatz abzuleiten.“

Ob die Theorie der Teilchenphysik kriselt, ist offensichtlich eine Frage der Perspektive. Manche Schulen stehen

tatsächlich vor den Trümmern jahrzehntelanger Arbeit, andere sind nicht betroffen. Wie aber schätzen Experimentalphysiker die Lage ein? Sie testen die Vorhersagen aus der Theorie. Ein solcher Experimentator ist Siegfried Bethke, Direktor am Max-Planck-Institut für Physik in München.

### ERHOFFTE FINGERZEIGE AUF DIE DUNKLE MATERIE

Bethke hat mit seiner Gruppe den Atlas-Detektor, eines der beiden großen Experimente, die am LHC das Higgs aufspürten, von der Max-Planck-Seite aus federführend mitentworfen und aufgebaut. Als deutscher wissenschaftlicher Delegierter im Cern Council, dem Forschungsrat des Cern, arbeitet er gerade an der Aktualisierung der europäischen Strategie in der Teilchenphysik mit.

„Die Teilchenphysik ist nicht in einer Krise – obwohl es nicht einfach ist, jetzt die Zukunft zu planen“, sagt auch Siegfried Bethke. Selbst wenn derzeit Vorgaben aus der Theorie fehlten, gebe es für die Experimentalphysik viel zu tun. Vor allem seien viele Eigenschaften des Higgs-Bosons noch unbekannt. Da es sich um ein zentrales Teilchen im Standardmodell handelt, wollen Teilchenphysiker es genau vermessen. Außerdem erhoffen sie sich von der Analyse des Higgs-Teilchens Fingerzeige, wo und wie sie weiter nach der Dunklen Materie suchen können.

Denn die Dunkle Materie macht sich bisher nur durch ihre Gravitation bemerkbar, die mit dem Higgs-Boson verbunden ist.

Allerdings eignet sich der LHC für genaue Untersuchungen des Higgs-Teilchens nicht so gut, weil er es zu selten erzeugt. Der LHC war sozusagen die Suchmaschine, um es überhaupt zu finden. Deshalb diskutiert die Teilchenphysik kleinere, spezialisierte Beschleuniger, die das Higgs-Teilchen in hohen Raten erzeugen, um es effizient analysieren zu können. Eine solche „Higgs-Fabrik“ soll der International Linear Collider (ILC) sein, der seit Jahren in Japan geplant wird. Doch ob dieses Projekt verwirklicht wird, ist offen.

Der ILC wäre auch technisch ein konventioneller Beschleuniger. Siegfried Bethke plädiert für eine unkonventionelle Alternative, die derzeit am Cern unter dem Schlagwort CLIC (Compact Linear Collider) entwickelt wird. CLIC würde in Genf zwar einen neuen, geraden Tunnel erfordern. Da er aber höhere Energie als der ILC erreichen könnte, würde er auch die Untersuchung des 1995 entdeckten Top-Quarks erlauben – der letzten erfolgreichen Teilchenvorhersage von 1977. Dieses Quark ist so schwer wie ein Goldatom, es existierte nur kurz nach dem Urknall und lässt sich heute im Teilchenbeschleuniger erzeugen.

CLIC böte damit einen tiefen Einblick in die Physik des heißen, kompakten Babyuniversums. Und in der ferneren Zukunft könnte in dem CLIC-Tunnel eine revolutionäre Beschleunigertechnik eingebaut werden, die derzeit unter dem Schlagwort AWAKE am Cern untersucht wird. Diese könnte wesentlich höhere Energien erreichen und damit noch kleinere Strukturen in der Welt der Elementarteilchen ausleuchten.

Ob solche Beschleuniger die Tür zu neuer Physik aufstoßen werden, lässt sich nicht vorhersagen – wie so oft in der Grundlagenforschung. Doch in der Physik sind große Entdeckungen selten planbar. Das ist nicht anders als bei Christoph Kolumbus, der einen Seeweg nach Indien suchte, unterwegs fast an einer Meuterei scheiterte und schließlich Amerika entdeckte. ◀

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Experimente am Large Hadron Collider haben zum Nachweis des Higgs-Teilchens geführt; andere vorhergesagte Entdeckungen wie etwa die supersymmetrischer Teilchen blieben aber aus.
- Da sich manche Vorhersagen der theoretischen Teilchenphysik nicht erfüllten, fordern einige Theoretiker, nicht länger auf sämtlichen bisherigen Leitlinien der Theorieentwicklung zu beharren. Sie stellen etwa Natürlichkeit, Eleganz der mathematischen Konstruktion und Symmetrie als Kriterien infrage.
- Doch gerade die Symmetrie sehen viele Theoretiker, darunter auch Max-Planck-Wissenschaftler Hermann Nicolai, als wichtige Leitlinie für die Entwicklung neuer Theorien an. Dazu zählt vor allem die Suche nach einer Theorie, welche die allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmechanik zu einer Quantengravitation vereinigt.
- Ungeachtet der theoretischen Neuorientierung sehen experimentelle Teilchenphysiker die Möglichkeit, mit Teilchenbeschleunigern zahlreiche Forschungsfragen zu beantworten. So wollen sie die Eigenschaften des Higgs-Teilchens genau vermessen und erhoffen sich davon auch Hinweise auf die Dunkle Materie.

## GLOSSAR

**Hierarchieproblem** nennen Physiker den extremen Unterschied in der Größe der starken und schwachen Kernkraft sowie der elektromagnetischen Kraft einerseits und der viel schwächeren Gravitation andererseits. Das gilt auch für den Sprung von den Elementarteilchen hinunter zur extrem kleinen „Planck-Skala“, die ein fundamentales Bezugssystem der Physik darstellt. Auf dieser Skala lassen sich die vier Grundkräfte möglicherweise vereinigen.

**Natürlichkeit** ist bislang eine Leitlinie für die theoretische Teilchenphysik in der Entwicklung neuer Theorien. Kritiker betrachten sie als Irrweg.

**Standardmodell der Teilchenphysik:** Es beschreibt die Vorgänge in der Mikrowelt und umfasst die Elementarteilchen, aus denen Materie aufgebaut ist, die Kräfte zwischen diesen Teilchen sowie dem Higgs-Mechanismus und dessen Higgs-Teilchen. Dieses Standardmodell folgt den Gesetzen der Quantenmechanik.

**Symmetrie** spielt in der Physik eine große Rolle. Ein Beispiel sind die Eigenschaften von Antimaterie, die spiegelbildlich zur Materie sind. Der britische Theoretiker Paul Dirac hat so deren Existenz vorhergesagt. Die theoretische Physik nutzt aber auch viele abstrakte, mathematische Symmetrien.

## Wissenschaft in einer Sprache, die jeder versteht.

Das Nationale Institut für Wissenschaftskommunikation (NaWik) bietet praxisnahe Seminare für gute **Wissenschaftskommunikation** an.

Die Seminare können von wissenschaftlichen Einrichtungen, Arbeitsgruppen oder Graduiertenschulen gebucht und **vor Ort realisiert** werden.

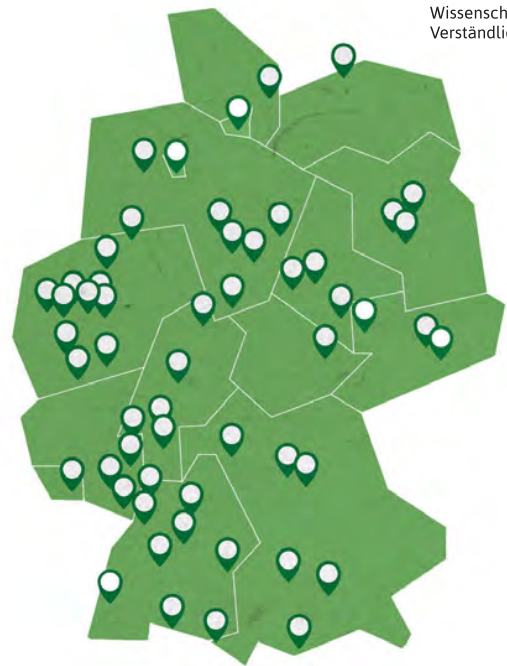
Das Portfolio an zwölf Seminararten reicht von **Schreibseminaren** über **Social-Media-Kurse** bis hin zu **Präsentations- oder Medientrainings**.

Alle Seminare werden **evaluiert**.

Weitere Angebote und das gesamte Seminarportfolio sind auf [www.nawik.de](http://www.nawik.de) zu finden.

**NaWik**

Wissenschaft.  
Verständlich.



Veranstaltungsorte, Stand 2019