

## TEILCHENPHYSIK

# Wegweiser zu neuer Physik

**Nach der Entdeckung des Higgs-Bosons geht es nun darum, seine Eigenschaften präzise zu bestimmen und so Hinweise auf neue Physik zu suchen.**

Roger Wolf, Karsten Köneke und Heidi Rzehak

Mehr als neun Jahre und zwei Messkampagnen liegt die Entdeckung eines Higgs-Bosons am Large Hadron Collider des CERN zurück. Inzwischen hat sich ein Fünfzehnfaches der Datenmenge von damals angesammelt, und die Schwerpunktsenergie des Beschleunigers wurde von 8 auf 13 TeV gesteigert. Dies ermöglichte es, wissenschaftliches Neuland zu betreten und das Higgs-Boson systematisch zu erforschen. Viele seiner Eigenschaften wurden präzise gemessen. So ist es möglich, Hinweise auf neue Physik zu erhalten, selbst wenn diese zunächst nicht direkt beobachtbar sein sollte.

**D**er Brout-Englert-Higgs-Mechanismus löst ein fundamentales Problem des Standardmodells der Teilchenphysik. Diese moderne Quantenfeldtheorie erklärt und beschreibt alle fundamentalen Wechselwirkungen aller bekannten Teilchen untereinander – mit Ausnahme der Gravitation. Die Wechselwirkungen erfolgen über Vermittlerteilchen: das Photon ( $\gamma$ ) im Fall der

Elektrodynamik, die W- und Z-Bosonen für die schwache Kraft und die Gluonen (g) im Fall der starken Kraft. Die Existenz, Dynamik und nahezu alle Eigenschaften dieser Vermittlerteilchen lassen sich aus der Forderung lokaler Eichsymmetrien, wie sie aus der Elektrodynamik bekannt sind, ableiten [1]. Eichtheorien haben aber eine Schwäche: Sie erfordern zwingend, dass alle Vermittlerteilchen masselos sein müssen, da ein von Null verschiedener Massenterm die Eichsymmetrie zerstört. Diese Forderung steht jedoch in eklatantem Widerspruch zu den experimentell nachgewiesenen hohen Massen der W- und Z-Bosonen. Einen Ausweg aus diesem Dilemma bietet die spontane Symmetriebrechung. Dabei besitzt das physikalische System zwar alle erforderlichen Symmetrien. Allerdings erscheinen die Eichsymmetrien im energetischen Grundzustand der Natur – dem Vakuum – teilweise gebrochen, wodurch die W- und Z-Bosonen dynamisch eine Masse erhalten [2, 3].

Dieser Mechanismus sagt die Existenz eines neuen fundamentalen Teilchens vorher: das Higgs-Boson. Die-

◀ Am ATLAS-Experiment des Large Hadron Collider am CERN lassen sich die Eigenschaften des Higgs-Bosons präzise untersuchen und mit den Ergebnissen des CMS-Experiments vergleichen.

ses entsteht aus der Quantisierung und Anregung eines postulierten Higgs-Feldes im Vakuum. Es ist das einzige bekannte Elementarteilchen ohne Spin und wechselwirkt mit allen bekannten Teilchen des Standardmodells – bei Fermionen proportional zu deren Masse, bei Bosonen mit dem Quadrat der Masse. Die Masse des Higgs-Bosons sagt das Standardmodell jedoch nicht vorher. Lange nach seiner Postulierung 1964 [3] galt das Teilchen als unmessbar. Doch 2012 wurde ein neues Teilchen mit genau den erwarteten Eigenschaften entdeckt [4].

### Eigenschaften des entdeckten Teilchens

Die LHC-Experimente ATLAS und CMS erbrachten unabhängig voneinander den Nachweis eines Higgs-Bosons in kombinierten Analysen mehrerer seiner Zerfallskanäle. Einer davon ist der Zerfall in zwei Photonen, in dem sich aus den gemessenen Energien und Impulsen der Photonen die Masse des ursprünglichen Teilchens ableitet. Das neue Teilchen zeigt sich durch eine lokale Anhäufung von Ereignissen im Massenspektrum der beiden Photonen; der genaueste gemessene Wert für die Masse des Higgs-Bosons beträgt  $125,38 \pm 0,14$  GeV [5]. Da Photonen den Spin 1 tragen, muss das ursprüngliche Teilchen ebenfalls einen ganzzahligen Spin tragen, also ein Boson sein. Das Higgs-Boson kann auch über zwei Z-Bosonen in vier Leptonen zerfallen. Mit den Winkeln zwischen den Bewegungsrichtungen dieser Leptonen ließen sich mehrere alternative Hypothesen ausschließen – unter anderem ein von Null verschiedener Spin – typischerweise mit mehr als 99 Prozent Konfidenz [6]. Das beobachtete Teilchen besitzt somit die für ein Higgs-Boson erwarteten Quantenzahlen des Vakuums. Als erstes experimentell nachgewiesenes Elementarteilchen hat es keinen Spin und nimmt schon deshalb eine Sonderstellung ein.

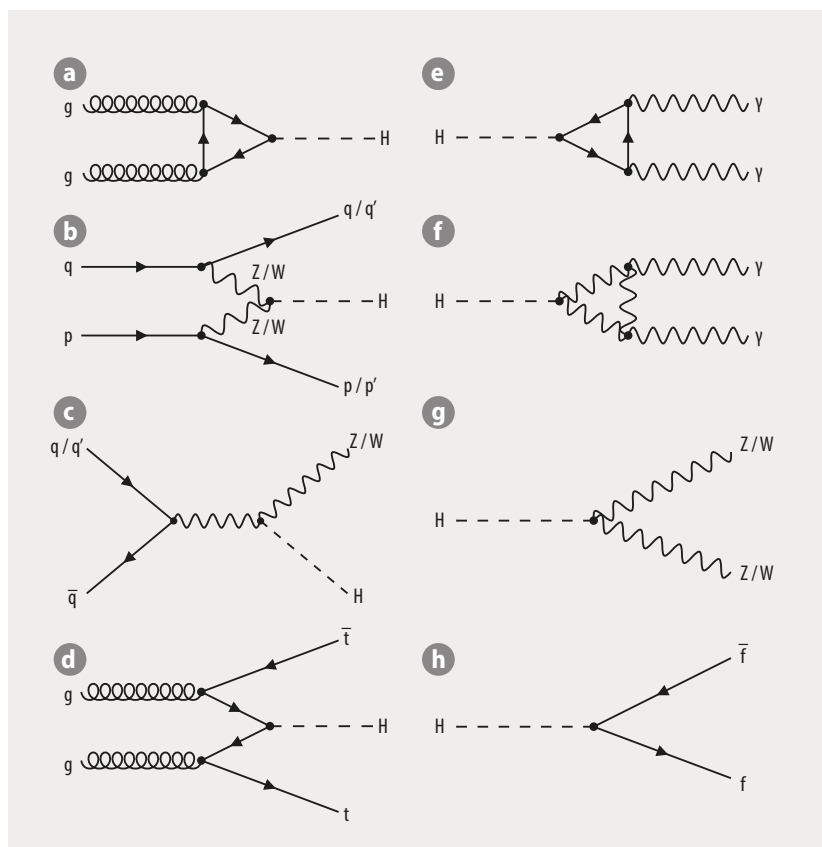
Aufgrund der nun bekannten Masse des Higgs-Bosons ist es möglich, seine dominanten Produktions- und Zerfallsraten mit einer Präzision zwischen einem und acht Prozent im Standardmodell vorherzusagen [7]. Am LHC treten primär die Zerfälle in W- oder Z-Bosonen, Photonen, b-Quarks und  $\tau$ -Leptonen auf (Abb. 1). Die Sensitivität der Experimente hängt davon ab, wie gut sich die entsprechende Zerfallssignatur von der überwältigenden Menge von Prozessen unterscheiden lässt, die nichts mit der Produktion von Higgs-Bosonen zu tun haben: Nur bei einer von etwa 1,5 Milliarden Proton-Proton-Kollisionen entsteht ein Higgs-Boson. Jeder Zerfallskanal bringt andere experimentelle Herausforderungen mit sich, sodass diese zunächst getrennt untersucht werden. Zu beachten ist, dass die Wechselwirkung des Higgs-Bosons mit schweren Teilchen stärker ist als mit leichten. Eine umfassende Analyse des gesamten Datensatzes der ersten Messkampagne 2011/12

der Experimente ATLAS und CMS bestätigte dieses charakteristische Verhalten für das beobachtete Teilchen mit einer Messgenauigkeit von 10 bis 20 Prozent (Abb. 2) [8].

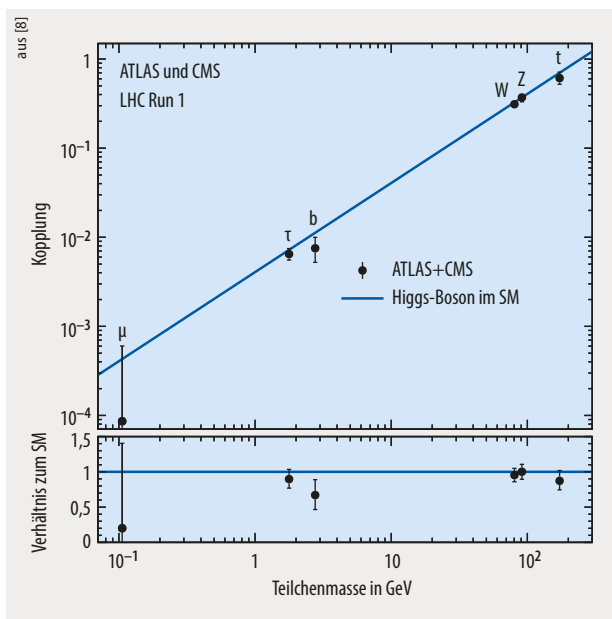
Das neu entdeckte Teilchen verdient also zurecht die Bezeichnung Higgs-Boson. Allerdings könnte der in der Natur verwirklichte Mechanismus zum Generieren der Teilchenmassen noch innerhalb der Messgenauigkeiten von der im Standardmodell gewählten Formulierung abweichen. Außerdem könnte das beobachtete Teilchen nur eines von mehreren Higgs-Bosonen in einer erweiterten Theorie sein.

### Auf der Suche nach der umfassenden Theorie

Die Entdeckung eines Higgs-Bosons mit Eigenschaften, die bislang im Rahmen der Messgenauigkeit mit dem Standardmodell übereinstimmen, machen dieses Modell zu einer in sich geschlossenen und konsistenten Theorie, welche die Beobachtungen beschreibt. Allerdings gibt es Hinweise, dass es eine noch unbekannte, umfassendere Theorie gibt, für die das Standardmodell nur eine niederenergetische, effektive Näherung darstellt. Denn einige fundamentale Beobachtungen erklärt das Standardmodell nicht. Dazu gehören die Existenz Dunkler Materie, die nicht oder nur



**Abb. 1** Am LHC entsteht das Higgs-Boson in verschiedenen Prozessen: bei der Fusion zweier Gluonen über eine Fermion-Schleife (a) bzw. zweier W- oder Z-Bosonen (b) sowie in Assoziation mit einem W- oder Z-Boson (c) oder einem t-Quark-Antiquark-Paar (d). Auch unterschiedliche Zerfälle sind möglich: in zwei Photonen über eine Fermion- (e) bzw. eine W-Boson-Schleife (f) sowie direkt in W- oder Z-Bosonen (g) bzw. Fermionen (h). Punkte heben die Stellen hervor, an denen Teilchen aneinander koppeln. Die Kopplung des Higgs-Bosons erfolgt bei Fermionen proportional zur Masse, bei W- oder Z-Bosonen proportional zum Massenquadrat.



**Abb. 2** Die Kopplung des Higgs-Bosons hängt von der Masse der Teilchen ab, an die es koppelt. Messwerte (schwarz) und Vorhersage des Standardmodells (SM, blau) stimmen gut überein. Die Kopplung an W- und Z-Bosonen wurde entsprechend transformiert.

schwach mit der uns bekannten Materie in Wechselwirkung tritt, oder die Tatsache, dass im uns bekannten Universum Materie und Antimaterie nicht zu gleichen Teilen existieren. Ebenfalls offen ist die Frage, wie die Gravitation in der Theorie zu berücksichtigen ist.

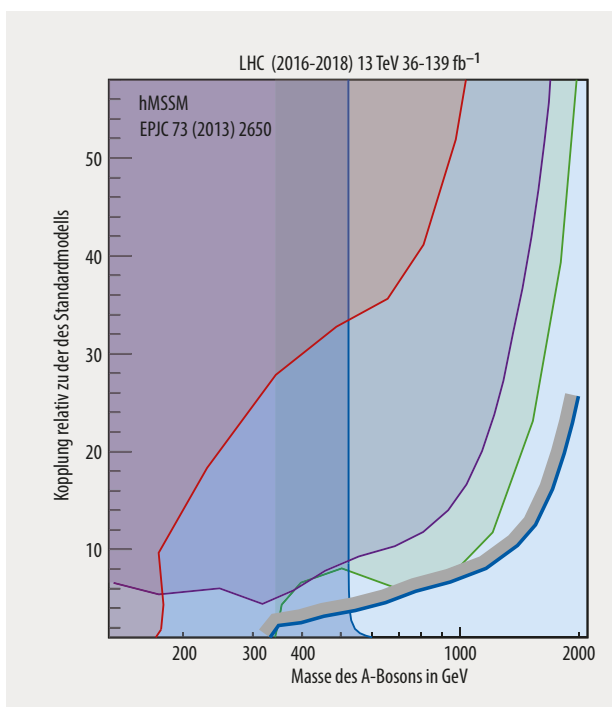
In Erweiterungen des Standardmodells treten in der Regel zusätzliche Higgs-Bosonen auf, zum Beispiel mit unterschiedlichen Massen, Ladungen und Wechselwirkungseigenschaften. Der direkte experimentelle Nachweis bestünde in der Entdeckung dieser Teilchen. Die Suche erfolgt

in allen am Large Hadron Collider zugänglichen Kanälen der untersuchten Modelle. Eine Klasse theoretisch gut motivierter Modelle sind supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells. Hierbei spannen z. B. die Masse eines weiteren neutralen Higgs-Bosons (A) und seine vorhergesagte Kopplung an bestimmte Fermionen – das  $\tau$ -Lepton, b-Quark oder Myon – den untersuchten Parameterraum auf (**Abb. 3**). Bisher wurden in solchen Suchen noch keine weiteren Higgs-Bosonen entdeckt. Dafür kann es mehrere Gründe geben.

Zum einen könnte die Masse der weiteren Higgs-Bosonen so groß sein, dass die Energie am LHC nicht ausreicht, um sie zu erzeugen. Zum anderen könnten die Erzeugungsraten zu gering sein, um sie signifikant von anderen Ereignissen zu unterscheiden. Neue Physik kann jedoch auch bereits beobachtbare Teilchen beeinflussen und so indirekt sichtbar werden. Ein Beispiel sind schwere Teilchen, die durch Quanteneffekte, sogenannte Schleifen (**Abb. 1a**), die kinematischen Bedingungen der Higgs-Boson-Produktion verändern. Auf die Existenz weiterer Higgs-Bosonen lässt sich zudem aufgrund fundamentaler Summenregeln aus der genauen Kenntnis der Kopplungen des beobachteten Higgs-Bosons schließen: Durch jedes weitere Higgs-Boson weichen die gemessenen Kopplungen von der Vorhersage des Standardmodells etwas mehr ab. Diese Abweichungen können wenige Prozent betragen und für das bisher beobachtete Higgs-Boson auftreten. Weitere Higgs-Bosonen sind also nicht nur in direkten Suchen zugänglich, sondern auch wenn möglichst genaue Vorhersagen des Standardmodells auf dem Prozent-Niveau ein detailliertes Programm zur präzisen Vermessung der Kopplungen des beobachteten Higgs-Bosons vervollständigen.

### Indirekte Hinweise durch bestmögliche Präzision

Im Fokus der zweiten Messkampagne am Large Hadron Collider (2015 bis 2018) stand daher auch die genauere Erforschung der Eigenschaften des beobachteten Higgs-Bosons. Zunächst ging es um die zweifelsfreie Bestätigung seiner direkten Kopplungen an  $\tau$ -Leptonen, b- und t-Quarks [13]. Für die  $\tau$ -Leptonen reichte bereits die kombinierte Analyse der gesamten Daten der ersten Messkampagne an den Experimenten ATLAS und CMS aus [8]. Im



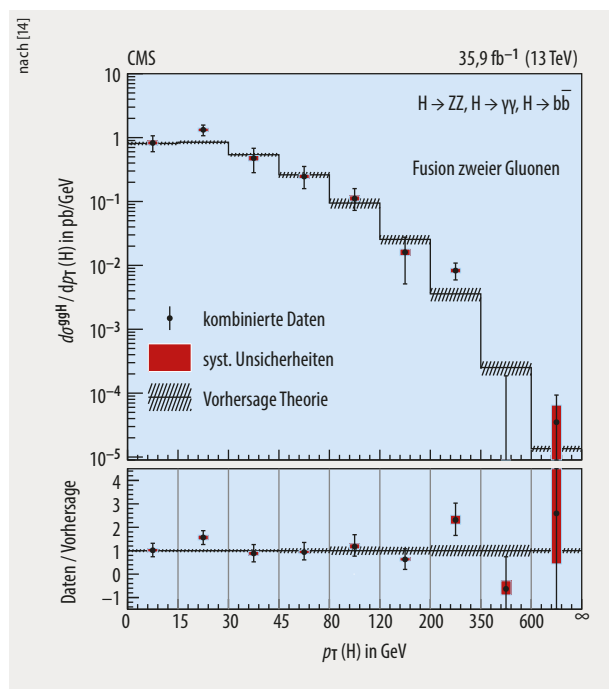
◀ **Abb. 3** Eine minimale supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells (hMSSM) erlaubt mehrere Higgs-Bosonen: drei neutrale (A, H und h) und zwei elektrisch geladene ( $H^\pm$ ), wobei das h-Boson mit dem beobachteten Higgs-Teilchen identifiziert wird. Die bisher analysierten Daten schließen verschiedene Parameterbereiche experimentell aus, weil dort kein weiteres Higgs-Boson entdeckt wurde: ATLAS  $A/H \rightarrow \tau\tau$  (grün) [9], CMS  $A/H/h \rightarrow \tau\tau$  (lila) [10], ATLAS  $H^\pm \rightarrow \nu\tau$  (rot) [11] und CMS  $h(125)$ -Kopplung (blau) [12]. Das CMS-Experiment erwartet im Kanal  $A/H \rightarrow \tau\tau$ , für die gesamte Lebensdauer des Large Hadron Collider noch größere Parameterbereiche abzudecken (blau mit grauem Band). Bei einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV sind Massen des A-Bosons bis zu 2 TeV experimentell zugänglich.

Standardmodell lassen sich die Stärken dieser Kopplungen für alle Elementarteilchen in Relation zu ihrer Masse berechnen. Um die Relationen experimentell zu testen, erweitern freie Parameter das Modell, sodass die vorhergesagten Kopplungsstärken individuell skalierbar werden. Die Kombination der Messdaten mehrerer Produktions- und Zerfallskanäle erlaubt es dann, die freien Parameter zu bestimmen und Abweichungen der (effektiven) Kopplungsstärken des Higgs-Bosons von den präzisen Vorhersagen des Standardmodells zu quantifizieren (Abb. 2). Entscheidend ist dabei das Zusammenspiel der Beobachtungen in den verschiedenen Produktions- und Zerfallskanälen. Zum Beispiel liefert die Produktion des Higgs-Bosons durch die Fusion zweier Gluonen Rückschlüsse auf die Kopplung des Higgs-Bosons an t-Quarks oder – durch die Formulierung einer effektiven Kopplung – an Gluonen. Solche statistischen Analysen angepasster Parametersätze enthalten neben den eigentlichen Modellparametern hunderte weitere, zum Teil korrelierte Parameter, um systematische Unsicherheiten zu berücksichtigen.

Dieser Ansatz hat sich als sehr erfolgreich erwiesen und die Untersuchung der Kopplungen des beobachteten Higgs-Bosons bis weit über die erste Messkampagne hinaus bestimmt. Er birgt jedoch auch fundamentale Schwächen. So berücksichtigt er nur globale Messungen der Raten in jedem Produktions- und Zerfallskanal. Diese globalen Raten sind aber meist nur wenig sensitiv für neue Physik. Eine größere Abhängigkeit findet sich bei kinematischen Variablen. Beispielsweise erfolgen detaillierte Untersuchungen der kinematischen Eigenschaften auch als Funktion des gemessenen Impulses des Higgs-Bosons in der Ebene senkrecht zur Achse der kollidierenden Protonenstrahlen (Abb. 4) [14]. Dieser  $p_T(H)$  genannte Impuls ist gerade bei großen Werten sensitiv für neue Physik. Doch diese Werte beeinflussen die Gesamtrate nur gering aufgrund der vergleichsweise wenigen Ereignisse, die sich dort finden.

### Effektiv zu neuer Physik

Verbesserte, theoretisch wohldefinierte Modelle zur Parameterbestimmung basieren auf einer effektiven Feldtheorie (EFT) [15]. Hiermit lassen sich alle Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells aufgrund neuer Physik parametrisieren, die im Rahmen physikalischer Symmetrieüberlegungen auftreten können. Neue Teilchen, die zu schwer für eine direkte Beobachtung am Large Hadron Collider sind, führen zu Kopplungen, die ein EFT-Operator  $O_i$  mit zugehörigem Parameter  $c_i$  beschreiben kann (Abb. 5). Der Ansatz spezifiziert nicht näher, woher diese Kopplungen stammen. Die Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells entsprechen dann dem Durchschimmern einer höheren, das Standardmodell umfassenden Theorie. Die zusätzlichen EFT-Operatoren erlauben es, Abweichungen in kinematischen Verteilungen vorherzusagen, und bieten jederzeit eine konsistente (effektive) Erweiterung des Standardmodells. Auf dieser Grundlage lassen sich die gewonnenen Ergebnisse physikalisch interpretieren. Dies gilt insbesondere in Bezug auf spezifische Erweiterungen des Standardmodells, die über den oben be-

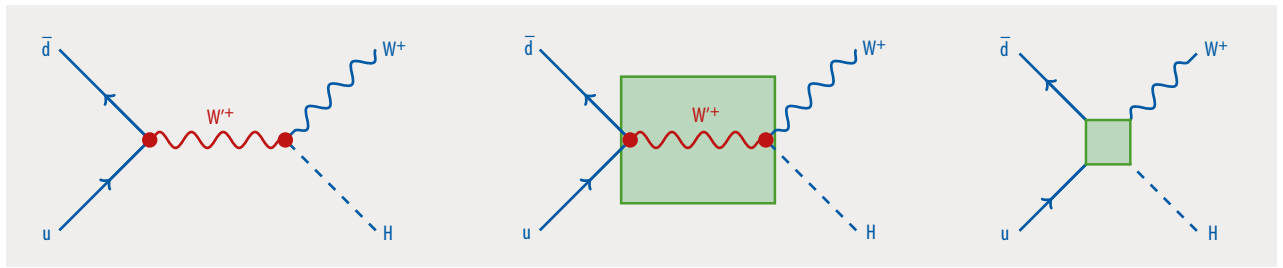


**Abb. 4** Der Wirkungsquerschnitt für die Produktion des beobachteten Higgs-Bosons lässt sich als Funktion des Impulses in der Ebene transversal zu den einfallenden Protonenstrahlen  $p_T(H)$  angeben. Die Fehlerbalken der Messpunkte verdeutlichen die systematische und statistische Unsicherheit; die systematische Unsicherheit allein ist rot dargestellt. Die Messungen stimmen gut mit der Theorie (schraffiert) überein.

schriebenen Zusammenhang mit der effektiven Feldtheorie in Beziehung stehen.

Falls sich solche Abweichungen manifestieren, gilt es in einem zweiten Schritt, gerade diejenigen Erweiterungen des Standardmodells zu überprüfen, welche die beobachteten Abweichungen am besten beschreiben. Dieses Vorgehen hilft bei der Suche nach einer experimentellen Evidenz möglicher Erweiterungen. Beispielsweise könnte dies eine der bereits erwähnten supersymmetrischen Theorien sein. Eine Herausforderung des EFT-Ansatzes besteht in der schier Anzahl der zum Teil korreliert auftretenden Operatoren und in der nicht immer einfachen Interpretation ihrer physikalischen Bedeutung.

Mithilfe kombinierter Messungen vieler Produktions- und Zerfallskanäle lassen sich die Beiträge mehrerer solcher Operatoren gleichzeitig experimentell bestimmen. Die Wirkungsquerschnitte der einzelnen Produktionskanäle werden in exklusiven Phasenräumen gemessen, die explizite kinematische Information enthalten. Die konkrete Definition dieser kinematischen Bereiche erfolgt in enger Zusammenarbeit von Experiment und Theorie. Das minimiert theoretische Unsicherheiten und erleichtert die Kombination der experimentellen Ergebnisse. Mit dieser Methode lassen sich beispielsweise die 32 relevanten Operatoren der „Warschau-Basis“ einer EFT-Implementierung des Standardmodells (SMEFT) [15] genauer untersuchen (Abb. 6) [16]. Falls zum Beispiel der Operator  $O_{Hq}^{(3)}$  (Abb. 5) existiert, sollten zusammen mit W-Bosonen deutlich mehr Higgs-Bosonen entstehen (Abb. 1c) als im Standardmodell vorhergesagt – insbesondere bei hohem transversalen Im-



**Abb. 5** Ein schweres Teilchen schimmert durch einen zusätzlichen EFT-Operator durch (Mitte). Im Beispiel verknüpft ein  $W^+$ -Boson den Anfangszustand aus einem Quark-Antiquark-Paar mit dem Endzustand aus einem  $W^+$ - und einem Higgs-Boson (links). Ist das  $W^+$ -Boson sehr viel schwerer als die Schwerpunktsenergie, kann eine effektive Kopplung zwischen Quark, Antiquark, Higgs- und W-Boson einen Beitrag zum  $O_{Hq}^{(3)}$ -Operator liefern (rechts, grün).

puls des produzierten W-Bosons. Gleichzeitig beeinflusst dieser Operator kinematische Verteilungen in der Vektor-Boson-Fusion (**Abb. 1b**). Mit dieser ersten Messung gelang es jedoch nicht, alle 32 Parameter gleichzeitig zu bestimmen. Daher erfolgte eine Auswahl der Richtungen im Parameterraum, auf welche die kombinierte Messung nicht sensitiv war und die sich somit ohne Einschränkung ignorieren ließ: Zehn Parameter(-Kombinationen) verblieben, deren Werte sich aus einer gleichzeitigen Anpassung an die Daten ergaben. Die oben erwähnte EFT-Implementierung des Standardmodells und die beschriebene Methode erlauben es weiterhin, Messungen außerhalb des Higgs-Sektors für eine globale Analyse der effektiven Feldtheorie zu nutzen. So lassen sich alle vorhandenen Messergebnisse im Rahmen der EFT bei einer globalen Suche nach neuen Effekten in der Teilchenphysik kombinieren.

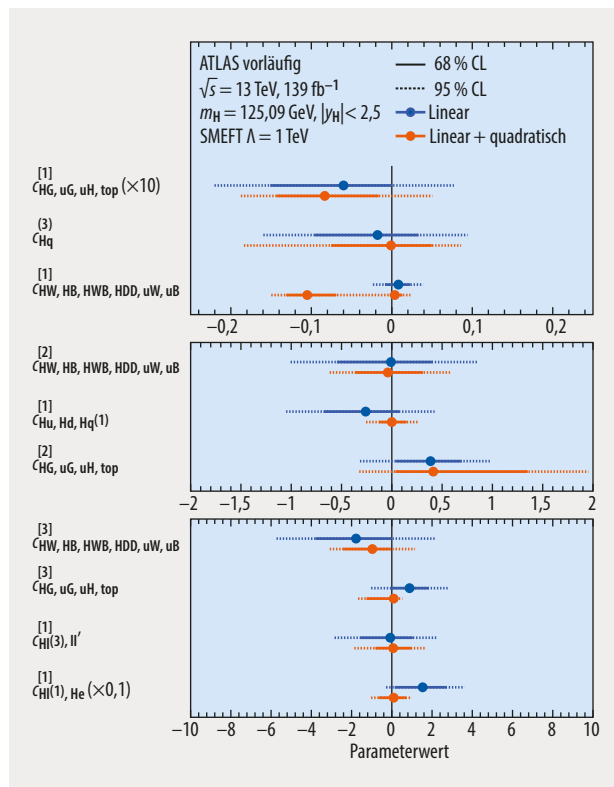
Wie hochkomplexe kunstvolle Mosaik bestehen solche Messungen aus vielen koordiniert zusammengetragenen

Einzelteilen. So verwundert es nicht, dass auch mehr als zwei Jahre nach Ende der zweiten Messkampagne die finale Veröffentlichung zum vollständigen Datensatz in allen Zerfallskanälen in beiden Experimenten – ATLAS und CMS – noch aussteht. Gleiches gilt für die theoretischen Grundlagen solcher Messungen, deren Entwicklung zeitgleich vorangetrieben wird. Datenanalyse und Theorie gehen Hand in Hand und sind aufeinander angewiesen.

### Ein Blick in die Zukunft

Am Large Hadron Collider ist derzeit von 2022 bis 2024 eine dritte Messkampagne geplant, die voraussichtlich die bisher aufgezeichnete Datenmenge noch einmal etwa verdoppeln wird. Mithilfe verfeinerter Analysemethoden könnten sich daraus die Kopplungen des beobachteten Higgs-Bosons mit einer Präzision von drei bis fünf Prozent ergeben. Von 2025 bis 2027 steht eine längere Pause an, um Beschleuniger und Experimente auf eine weitere Messkampagne bis zum Ende der 2030er-Jahre vorzubereiten. Diese soll den Datensatz nochmals verzehnfachen. Die ultimative Präzision für die experimentell bestimmten Kopplungen des beobachteten Higgs-Bosons sollte dann weniger als zwei Prozent für die meisten genannten Kopplungen betragen [17]. Die zusätzlichen Daten erweitern auch den Parameterraum für direkte Suchen nach weiteren Higgs-Bosonen, z. B. aus einer supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells.

Der nächste Schritt bei der Untersuchung des beobachteten Higgs-Bosons auf der Suche nach neuer Physik besteht im Bau eines Beschleunigers der nächsten Generation. Dieser muss es erlauben, die Kopplungen mit einer Präzi-



◀ **Abb. 6** Die unteren Indizes der Parameter  $c^{ij}$  ( $i$ : Richtungsvektor im Operatorraum) geben an, welche Operatoren auf mögliche Beiträge aus neuer Physik getestet wurden. Ein Wert von 0 steht für Kompatibilität mit dem Standardmodell, eine signifikante Abweichung davon für neue Physik. Gezeigt sind das Minimum sowie die 68 %- und 95 %-Konfidenzintervalle. Messwerte der Parameter der SMEFT-Implementierung [15] liegen in führender, „linearer“ Ordnung (blau) der EFT-Beiträge vor und unter Berücksichtigung der (unvollständigen) nächsthöheren Ordnung (orange) [16]. Stimmen beide Ergebnisse überein, sollte die berücksichtigte nächsthöhere Ordnung die Interpretation nicht wesentlich beeinflussen.

sion im Promillebereich zu bestimmen. Stehen dann noch höhere Energien als heute – im Bereich von mindestens 100 TeV – zur Verfügung, besteht die Hoffnung, in einen Bereich vorzudringen, in dem das Standardmodell seine Gültigkeit als effektive Näherung einer übergeordneten Theorie verliert und sich diese deutlich in den Daten zeigt.

**Literatur**

[1] S. *Glashow*, Nucl. Phys. **22**, 579 (1961); S. *Weinberg*, Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967); A. *Salam*, Conf. Proc. **C680519**, 367 (1968); D. J. *Gross* und F. *Wilczek*, Phys. Rev. Lett. **30**, 1343 (1973); H. D. *Politzer*, Phys. Rev. Lett. **30**, 1346 (1973)  
 [2] F. *Englert* und R. *Brout*, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (1964); P. W. *Higgs*, Phys. Lett. **12**, 132 (1964)  
 [3] P. W. *Higgs*, Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964)  
 [4] *ATLAS Coll.*, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012); *CMS Coll.*, Phys. Lett. B **716**, 30 (2012)  
 [5] *CMS Coll.*, Phys. Lett. B **805**, 135425 (2020)  
 [6] *ATLAS Coll.*, Phys. Lett. B **726**, 120 (2013); *CMS Coll.*, Phys. Rev. D **89**, 092007 (2014)  
 [7] LHC Higgs Cross Section Working Group, Handbook of LHC

Cross Sections: 3 Higgs Properties, arXiv:1307.1347 [hep-ph]; LHC Higgs Cross Section Working Group, Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector, arXiv:1610.07922 [hep-ph]  
 [8] *ATLAS Coll.* und *CMS Coll.*, JHEP **08**, 045 (2016)  
 [9] *ATLAS Coll.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 5 (2020)  
 [10] *CMS Coll.*, JHEP **09**, 007 (2018)  
 [11] *ATLAS Coll.*, JHEP **11**, 085 (2018)  
 [12] *CMS Coll.*, Eur. Phys. J. C **79**, 421 (2019)  
 [13] *ATLAS Coll.*, Phys. Rev. D **99**, 072001 (2019); *CMS Coll.*, Phys. Lett. B **779**, 708 (2018) ; *ATLAS Coll.*, Phys. Lett. B **784**, 173 (2018); *CMS Coll.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 231801 (2018); *ATLAS Coll.*, Phys. Lett. B **786**, 59 (2018); *CMS Coll.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 121801 (2018)  
 [14] *CMS Coll.*, Phys. Lett. B **792**, 369 (2019)  
 [15] B. *Grzadkowski* et al., JHEP **10**, 085 (2010); I. *Brivio* und M. *Trott*, Phys. Rept. **793**, 1 (2019); I. *Brivio* et al., JHEP **12**, 070 (2017); C. *Degrande* et al., feynrules.irmp.ucl.ac.be/wiki/SMEFTatNLO; S. *Dawson* und P. P. *Giardino*, Phys. Rev. D **98**, 095005 (2018)  
 [16] *ATLAS Coll.*, ATLAS-CONF-2020-053, CERN, Geneva (2020)  
 [17] A. *Dainese* et al, Physics of the HL-LHC, and perspectives at the HE-LHC, CERN Yellow Reports: Monographs Vol. 7 (2019)

**Die Autor:innen**

**Roger Wolf** (FV Teilchenphysik und FV Physik der Hadronen und Kerne) hat an der U Heidelberg studiert und 2006 promoviert. Seither ist er Mitglied der CMS-Kollaboration und war an der ersten Messung der t-Quark-Paarproduktion und an der Entdeckung des Higgs-Bosons direkt beteiligt. Heute sucht er nach (weiteren) Higgs-Bosonen und untersucht den Zerfall des Higgs-Teilchens in  $\tau$ -Leptonen. Seit 2016 ist er am KIT habilitiert.



**Karsten Köneke** (FV Teilchenphysik und FV Physik der Hadronen und Kerne) hat 2007 am Massachusetts Institute of Technology promoviert. Nach Stationen am DESY, als Research Fellow am CERN und als Marie Curie Fellow ging er 2013 an die U Freiburg, wo er 2018 habilitierte. Er hat die ATLAS-Arbeitsgruppe zu Zerfällen des Higgs-Bosons in zwei W-Bosonen mitgeleitet und war Co-Leiter der gesamten ATLAS-Higgs-Arbeitsgruppe.



**Heidi Rzehak** (FV Teilchenphysik) hat 2005 an der TU München promoviert. Am Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz und am Karlsruher Institut für Technologie hat sie präzise Vorhersagen im Standardmodell und für seine Erweiterungen berechnet. Sie habilitierte 2016 an der U Freiburg. Stationen am CERN und an der University of Southern Denmark, Odense, führten sie auf eine Heisenberg-Stelle an der U Tübingen.



**Priv.-Doz. Dr. Roger Wolf**, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Karlsruher Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Str. 1, 76131 Karlsruhe; **Priv.-Doz. Dr. Karsten Köneke**, Physikalisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Hermann-Herder-Str. 3, 79104 Freiburg; **Priv.-Doz. Dr. Heidi Rzehak**, Institut für Theoretische Physik, Eberhard Karls Universität Tübingen, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen



Die  
**Mediadaten 2022**  
mit Erscheinungs- und Themenplänen liegen vor.

Bitte anfordern bei:  
**Änne Anders, aanders@wiley.com**

Mediadaten 2022

MEDIADATEN





2022  
**Physik Journal**

Überzeugende Lösungen durch strategische Partnerschaften  
[www.physik-journal.de](http://www.physik-journal.de)

WILEY