

TEILCHENPHYSIK

Vierblättriger Vektorboson-Klee

Unter Einsatz neuer Analysemethoden ist der Nachweis seltener Ereignisse der Vektorboson-Streuung am Large Hadron Collider gelungen.

Andreas Hinzmann, Alexander Huss und Kristin Lohwasser

Wenn die Eichbosonen des Standardmodells der Teilchenphysik miteinander wechselwirken, könnten sich dabei Hinweise auf Physik jenseits der etablierten Theorie zeigen. Nun ist es mithilfe neuer Methoden bei der Datenanalyse erstmals gelungen, die Wechselwirkung zwischen vier Eichbosonen am Large Hadron Collider zu beobachten: die Vektorboson-Streuung. Dieser Meilenstein erlaubt es, den Higgs-Mechanismus tiefergehend zu verstehen.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt unser gesamtes gegenwärtiges Wissen über Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen. Mathematisch als Quantenfeldtheorie formuliert, macht es sehr konkrete Vorhersagen, die sich experimentell überprüfen

lassen. Das Konstruktionsprinzip dieser erfolgreichen Theorie basiert auf Eichsymmetrien. Diese beschreiben die Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen durch den Austausch zugehöriger Eichbosonen, die mit einer gewissen Stärke aneinander koppeln. Eichbosonen sind selbst Elementarteilchen mit einem Spin von 1; sie heißen daher auch Vektorbosonen. Als Beispiel beschreibt der Austausch von Photonen die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen elektrisch geladenen Teilchen.

Die Forderung von Symmetrien schränkt die Theorie jedoch stark ein. So verbietet sie zunächst jegliche Massen für die Austauschteilchen der Wechselwirkungen – ein wortwörtlich massives Problem bei der Formulierung des Standardmodells in den 1950er- und 1960er-Jahren. Erst die Einführung eines neuen Quantenfeldes, des Higgs-Feldes,

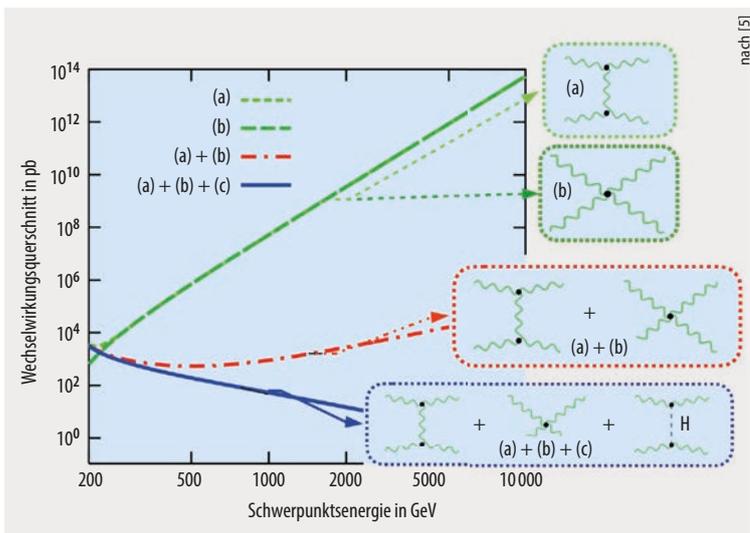


Abb. 1 Die Feynman-Diagramme illustrieren Beiträge zum Wechselwirkungsquerschnitt für die Streuung longitudinal polarisierter Vektorbosonen. Dazu gehören der Austausch eines Vektorbosons und die direkte Wechselwirkung zwischen vier Bosonen (grün). In Summe steigt der Wirkungsquerschnitt dieser Prozesse mit wachsender Schwerpunktsenergie bis ins Unermessliche (orange). Unter Berücksichtigung von Teilprozessen, bei denen ein Higgs-Boson (H) ausgetauscht wird, kommt es zu destruktiver Interferenz (blau): Die erwartete Ereignisrate reduziert sich auf einen endlichen Wert, und die Unitarität bleibt erhalten.

ermöglichte massive Austauschteilchen. Im mathematisch-theoretischen Jargon bricht das Higgs-Feld die Symmetrie spontan. Dieser mathematische Trick erlaubte es, die Existenz massiver Vektorbosonen konsistent in das Modell zu integrieren. Die Prozedur ist als Higgs-Mechanismus bekannt und sagt ein Teilchen ohne Spin vorher: das Higgs-Boson. Vor zehn Jahren gelang es am Large Hadron Collider, dieses nachzuweisen; im Jahr darauf erhielten Peter Higgs und François Englert für ihre Vorhersage den Physik-Nobelpreis.

Zum Higgs-Mechanismus gehören jedoch noch weitere Vorhersagen, die sich erst mit den Daten des zweiten Runs (2015 bis 2018) am Large Hadron Collider testen ließen. Dabei handelt es sich um den Nachweis der Vektorboson-Streuung: der Wechselwirkung von vier Vektorbosonen an einem Interaktionsvertex. Der Austausch massiver Vektorbosonen – des neutralen Z- und geladener W^\pm -Bosonen – beschreibt die dabei auftretende schwache Wechselwirkung, die auch für den radioaktiven Beta-Zerfall verantwortlich ist. Die Bezeichnung „schwach“ beschreibt nicht die Stärke der Kopplung, sondern beruht auf der großen Masse der Vektorbosonen. Diese führt dazu, dass die Wechselwirkung bei großen Abständen sehr schwach erscheint. Außerdem sorgt sie dafür, dass Prozesse der schwachen Wechselwirkung sehr selten stattfinden: Je mehr Vektorbosonen involviert sind, desto seltener. Entsprechend herausfordernd ist es, die Vektorboson-Streuung zu messen.

Die Studie der Wechselwirkungen zwischen massiven Vektorbosonen ist eng mit dem Higgs-Mechanismus und den Eigenschaften des Higgs-Bosons verknüpft, da im Standardmodell der Higgs-Mechanismus die Massen der Vektorbosonen verursacht. In einer Welt ohne Higgs-Boson werden die Vorhersagen für hochenergetische Kollisionen unphysikalisch. In diesem speziellen Fall verletzen sie das

allgemeine Prinzip der Wahrscheinlichkeitserhaltung oder Unitarität, demzufolge ein Prozess nicht mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 100 Prozent stattfinden kann: Die Vorhersagen sind inkonsistent und damit unbrauchbar. Damit die Vorhersagen innerhalb des Standardmodells physikalisch bleiben, müssen sich verschiedene Beiträge aufheben, was erst unter Einbeziehung des Austauschs von Higgs-Bosonen gelingt (**Abb. 1**). Die Wechselwirkungsquerschnitte stellen ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Prozesses dar: Sie sind direkt proportional zu der Anzahl der Ereignisse, die sich an Teilchenbeschleunigern beobachten lassen. Die theoretischen Vorhersagen für den Austausch eines Vektorbosons und die Wechselwirkung von vier Vektorbosonen an einem Interaktionsvertex steigen für sich alleine genommen bei großen Energien ins Unermessliche. Weil sich die Teilchen im Standardmodell – wie bei einer Quantenfeldtheorie erwartet – auch wie Wellen verhalten, kann es zwischen den Teilprozessen zu destruktiver Interferenz kommen. Für eine endliche und damit physikalische Wechselwirkungswahrscheinlichkeit gilt es, Beiträge des Higgs-Bosons zu berücksichtigen.

Schon vor dem Start des Large Hadron Collider stand daher fest, dass die Messungen das Higgs-Boson nachweisen würden oder dass an dessen Stelle neue Physik in der Vektorboson-Streuung zutage träte, die den Wechselwirkungsquerschnitt reduziert. Nach der Entdeckung des Higgs-Bosons gilt es nun, den Higgs-Sektor und die Vektorboson-Streuung zu untersuchen und Hinweisen auf mögliche neue Physik nachzugehen.

Herausfordernde Messung

Am Large Hadron Collider prallen Protonen und die darin gebundenen Quarks mit hoher kinetischer Energie aufeinander. Detektorsysteme wie ATLAS oder CMS weisen die Teilchen nach, die dabei entstehen. Alle Prozesse der Vektorboson-Streuung laufen ähnlich ab (**Abb. 2a**). Die Quarks strahlen die Vektorbosonen ab. Sobald diese miteinander wechselwirken, bildet sich ein Endzustand mit zwei Bosonen. Die Quarks und die verbleibenden Bruchteile der Protonen fliegen in der gleichen Richtung weiter und bilden Jets, kollimierte Strahlen von Mesonen und Baryonen. Diese charakteristischen Jets trennt meist nur ein geringer Streuwinkel von der jeweiligen Ursprungsrichtung des Protonenstrahls: Es handelt sich um sogenannte „Vorwärts-Jets“, die sich in den gegenüberliegenden Hemisphären des Detektors finden. Zwischen den Jets, also in dem Raum, den sie aufspannen, lassen sich die Vektorbosonen beziehungsweise ihre Zerfallsprodukte nachweisen. Zu den Signalen mit einer Signatur für Vektorboson-Streuung gehören also all jene Ereignisse mit zwei Jets unter Vorwärtswinkeln in unterschiedlichen Hemisphären und den Zerfallsprodukten zweier Vektorbosonen dazwischen.

Solche Ereignisse weisen die Detektoren ATLAS und CMS am Large Hadron Collider mit dem gleichen Messprinzip nach. Wie bei einer Zwiebel befinden sich um den Kollisionspunkt in verschiedenen Schichten Subdetektoren, die für die Messung bestimmter Teilcheneigenschaften spezialisiert sind. Der innerste Detektor, ein Spurdetektor,

zeichnet die Trajektorien geladener Teilchen auf. Ein Magnetfeld durchdringt den Spurdetektor, sodass die Lorentzkraft zu gekrümmten Flugbahnen führt, deren Radius von Impuls und Ladung der Teilchen abhängt. Die anschließenden Kalorimeter bestimmen durch die Absorption von Teilchen deren Energie. Unterschiedliche Absorptionsprofile erlauben es, Elektronen, Photonen und Hadronen zu unterscheiden. Weil Myonen nur wenig Energie in den Kalorimetern deponieren, vermessen spezielle Myondetektoren jenseits der Kalorimeter ihre Spur.

Aufgrund ihrer Kurzlebigkeit lassen sich W- und Z-Bosonen nur über ihre Zerfallsprodukte identifizieren. Dabei untersucht man meist den Zerfall in Elektronen oder Myonen sowie die zugehörigen Neutrinos. Letztere zeigen sich nur indirekt im fehlenden Transversalimpuls eines Ereignisses. Dieser errechnet sich aus der Summe der Impulsvektoren aller gemessenen Teilchen. Da die einlaufenden Protonen keinen Impuls transversal zur Strahlachse aufweisen, sollte diese Summe Null betragen. Die Abweichung davon müssen Neutrinos oder andere nicht detektierbare Teilchen als Transversalimpuls tragen. Einzelne Untersuchungen nutzen auch W- und Z-Bosonen, die in Quarks zerfallen und Jets bilden. Die Jets lassen sich aus den Energiedepositionen in den Kalorimetern und den Teilchenspuren im innersten Detektor rekonstruieren. Den Teilchenspuren kommt dabei eine besondere Bedeutung zu: Sie helfen dabei, Untergrundereignisse mit Jets aus zusätzlichen Protonen-Kollisionen zu unterdrücken, indem nur Jets als Signatur zählen, deren Spuren zum gleichen Kollisionspunkt entlang der Strahlachse gehören wie die Leptonen. Denn bei einem typischen Prozess der Vektor-

boson-Streuung (**Abb. 2b**) liegen die Ausgangspunkte so nah beieinander, dass sie räumlich nicht auflösbar sind.

Da die Vektorboson-Streuung über die elektroschwache Wechselwirkung stattfindet, ist die Produktion stark wechselwirkender Teilchen, insbesondere von Hadronen, zwischen den Jets stark unterdrückt. Außerdem befinden sich die beiden Leptonen zwischen den Jets. Beides hilft dabei, die Vektorboson-Streuung von der einfachen Produktion zweier Bosonen durch andere Prozesse zu unterscheiden. Letzteres könnte sonst leicht zu einem Untergrund für das Signal beitragen. Die Wahrscheinlichkeit, zwei zusätzliche Jets aus Abstrahlungen von Quarks oder Gluonen bei der einfachen Produktion zweier Bosonen oder aus zusätzlichen Protonen-Kollisionen zu erzeugen, ist nämlich größer als die Wahrscheinlichkeit der Vektorboson-Streuung – eine große Herausforderung für die Messung.

Nachweis bei ATLAS und CMS

Der Large Hadron Collider hat mittlerweile genug Daten geliefert, um die sehr seltenen Prozesse der Vektorboson-Streuung zu beobachten. Die ATLAS- und die CMS-Kollaborationen konnten mit den Daten aus Run 2 die Vektorboson-Streuung mit mehr als 5σ -Standardabweichung nachweisen. Damit beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass die Daten nur zufällig einem Prozess der Vektorboson-Streuung ähneln, weniger als 1 in 3,5 Millionen – und das, obwohl diese Prozesse noch seltener auftreten als die Produktion von Higgs-Bosonen durch die Wechselwirkung zweier Gluonen: In einer Billion Protonen-Kollisionen findet sich weniger als ein Streuprozess mit Vektorbosonen.

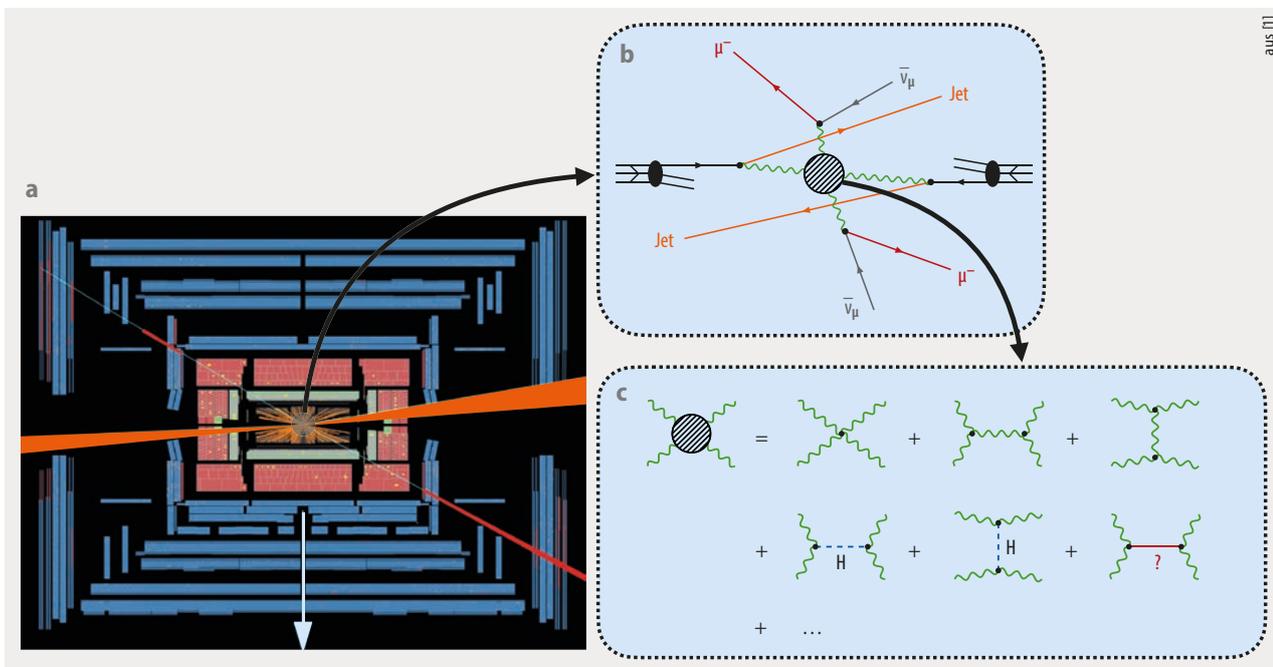


Abb. 2 Charakteristisch für einen Vektorboson-Streuprozess im ATLAS-Detektor sind die Spuren zweier negativ geladener Myonen (a, rot), die gleichzeitig mit zwei Jets (orange) auftreten. Der fehlende Transversalimpuls (hellblau) zeigt im Beispiel nach unten. Dieser Signatur liegt ein Prozess zugrunde (b), bei dem die Quarks der einlaufenden Protonen (schwarz) Vektorbosonen abstrahlen (grün). Diese streuen in zwei W-Bosonen (grün), die dann jeweils in ein beobachtbares Myon (rot) und ein Neutrino (grau) zerfallen; die Quarks fragmentieren in Jets (orange), die vom gleichen Punkt zu kommen scheinen. Die Streuung setzt sich aus mehreren Unterprozessen zusammen (c), deren Anteile sich theoretisch vorhersagen lassen. Die zugehörigen Feynman-Diagramme zeigen, dass teilweise ein Higgs-Boson (H) ausgetauscht wird.

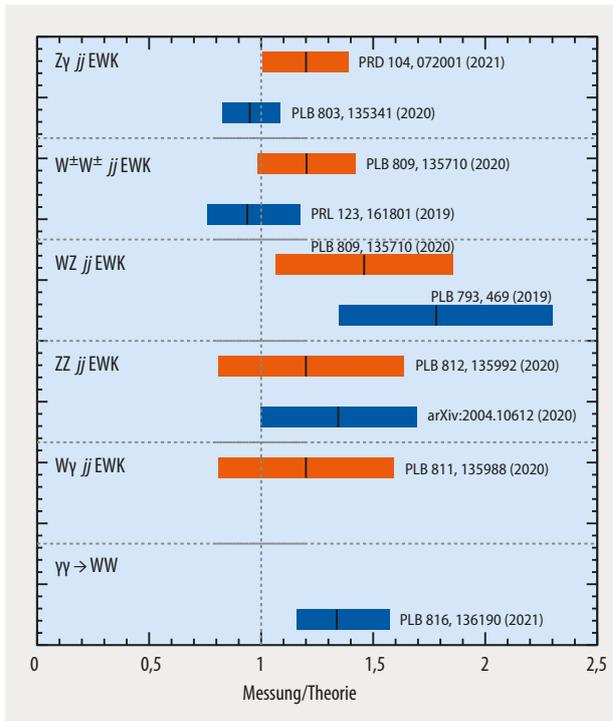


Abb. 3 Die Detektoren CMS (orange) und ATLAS (blau) haben bisher sechs Vektorboson-Streuprozesse nachgewiesen, in denen die Vektorbosonen W, Z und γ auftreten und in der Regel zwei Jets jj aus den Bruchteilen der Protonen. Der Vergleich von Messung und theoretischer Vorhersage zeigt jeweils den Zentralwert (schwarz) und ein Maß für dessen Unsicherheit: Mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 Prozent liegt der wahre Wert innerhalb des farbigen Bandes.

Die immense Anzahl von Protonen-Kollisionen bereitet allerdings auch Probleme. Der Large Hadron Collider beschleunigt mehr als zehn Millionen Protonen in einem Bündel. Ungefähr 40 Millionen Mal pro Sekunde passieren zwei dieser Protonenbündel einander im Kollisionspunkt in den Zentren des ATLAS- und des CMS-Detektors. Im Durchschnitt fanden während des Run 2 dabei jedes Mal etwa 33,7 Kollisionen statt. Diese verteilen sich entsprechend einer Normalverteilung über zwanzig Zentimeter entlang der Strahlachse; einzelne Kollisionen lassen sich auflösen, wenn sie mehr als einen Millimeter voneinander entfernt stattfinden. Aus den meisten dieser Kollisionen resultieren Jets und können damit ein Problem für die Messung der Vektorboson-Streuung darstellen: Falls die produzierten Jets gleichzeitig mit Leptonen auftreten, sehen sie den gesuchten Streuprozessen zum Verwechseln ähnlich

und lassen sich nur mittels innovativer Analysemethoden als Untergrund aussortieren (**Infokasten** „Maschinelles Lernen“).

Die beiden Experimente ATLAS und CMS haben bereits mehrere Endzustände von Vektorbosonen beobachtet (**Abb. 3**) [4], wobei der Schwellenwert für eine Beobachtung 5σ -Standardabweichung beträgt. Am sichersten nachgewiesen sind Endzustände von $Z\gamma$ und $W^\pm W^\pm$, gefolgt von WZ - und schließlich ZZ -Endzuständen. Beim Verhältnis von Messung und theoretischer Vorhersage stimmen die beiden Detektoren gut miteinander überein. Das trifft auch dann zu, wenn das Verhältnis deutlich von 1 abweicht, Theorie und Experiment also schlechter übereinstimmen. Das ist zum Beispiel für den Prozess $WZ jj$ der Fall. Allerdings ist diese Abweichung immer noch mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 5 Prozent konsistent mit dem Standardmodell. Eine präzisere Vermessung mit weiteren Daten vom Large Hadron Collider wird klären, ob diese Abweichung von Bedeutung ist.

Der erste beobachtete Prozess der Vektorboson-Streuung war die Streuung von zwei W-Bosonen in einen Endzustand mit zwei W-Bosonen gleicher elektrischer Ladung ($W^\pm W^\pm \rightarrow W^\pm W^\pm$, **Abb. 4a**). Hierfür reichten die Daten bei einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV von 2015 und 2016 aus, weil zu dem Endzustand $W^\pm W^\pm$ nur wenige Untergrundereignisse beitragen: Es gibt nur wenige Prozesse, die gleichgeladene Leptonen und einen fehlenden Transversalimpuls verursachen. Der meiste Untergrund stammt von Leptonen, meist Elektronen mit falsch rekonstruierter Ladung, oder von Ereignissen mit WZ -Bosonen, bei denen eines der Leptonen nicht detektiert wurde.

Die Streuung zweier masseloser Photonen $\gamma\gamma$ in einen Endzustand mit zwei schweren W-Bosonen hat bisher nur die ATLAS-Kollaboration beobachtet (**Abb. 4b**). Hier gilt es, nur solche Ereignisse auszuwählen, bei denen die einlaufenden Protonen Photonen abstrahlen, aber danach intakt bleiben. Deshalb finden sich keine Jets aus Bruchteilen von Protonen im Endzustand. Außerdem gibt es keinerlei Teilchenspuren um den Kollisionspunkt herum – abgesehen von zwei Leptonen, den Zerfallsprodukten der W-Bosonen.

Unbekannte Physik im Visier

Mit dem Nachweis der Vektorboson-Streuung steht nun die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells im Vordergrund. Die Entdeckung neuer Teilchen und Kräfte, die

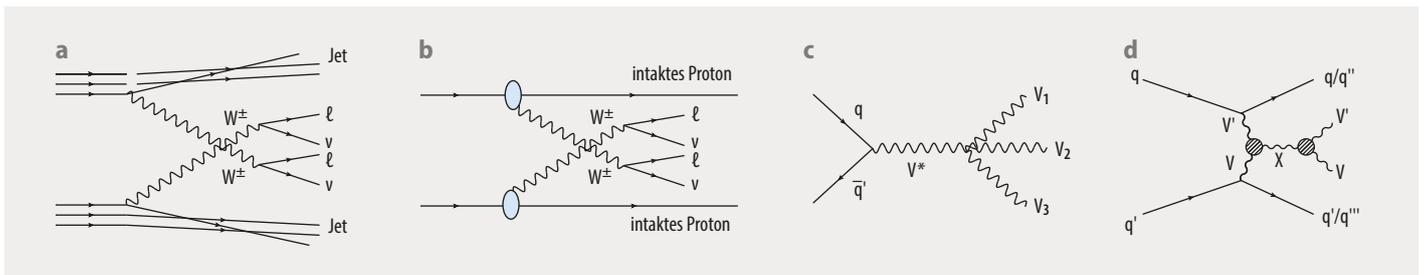


Abb. 4 Feynman-Diagramme stellen die Wechselwirkungen schematisch dar, die bei der Streuung zwei gleichgeladener W-Bosonen (a), der Streuung zweier Photonen in einen Endzustand mit zwei unterschiedlich geladenen W-Bosonen (b), der Erzeugung von drei schweren Vektorbosonen (c) und der Streuung zweier Vektorbosonen durch eine neue unbekannt Resonanz X (d) auftreten.

bei so hohen Energien relevant werden, wie sie im frühen Universum herrschten, kann wichtige Einblicke in bisher offene Fragen liefern, zum Beispiel:

- Was ist der Ursprung der Dunklen Materie, deren Existenz bisher nur durch gravitative Wechselwirkungen belegt ist, die aber sechsmal häufiger vorkommt als sichtbare Materie?
- Wie beschreibt man die Gravitation auf Quantenebene? Wieso ist ihre Kopplungsstärke um etliche Größenordnungen kleiner als bei den anderen fundamentalen Wechselwirkungen?
- Warum ist die Masse des Higgs-Bosons so klein, obwohl es sich auf die Physik bei hohen Energien so stark auswirkt (Hierarchie-Problem)?

Viele Erweiterungen des Standardmodells versuchen, diese Fragen zu beantworten, und haben gleichzeitig Auswirkungen auf die Paarproduktion von Vektorbosonen. Entsprechend sollten sie in den Messungen zur Vektorboson-Streuung am Large Hadron Collider nachweisbar sein. Ein Beispiel sind Modelle, die weitere schwere Higgs-Bosonen einführen, also neue Teilchen mit Spin Null, die sich als Resonanz in der Vektorboson-Streuung zeigen sollten. Die präzise Vermessung des Higgs-Bosons des Standardmodells hat solche Szenarien allerdings bereits stark eingeschränkt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Quantenfeldtheorie des Standardmodells zu erweitern. Dann stellt das Higgs-Boson kein Elementarteilchen mehr dar, sondern einen gebundenen Zustand kleinerer Bausteine. Dadurch ergeben sich neue schwere Austauschteilchen bisher unbekannter Kräfte mit Spin 1, die wiederum Vektorboson-Paare erzeugen. Als drittes Beispiel gibt es Szenarien, in denen mikroskopisch kleine Extradimensionen unseren dreidimensionalen Raum erweitern. Die für uns unsichtbar erscheinenden Extradimensionen führen bei hochenergetischen Teilchenreaktionen zu Gravitonresonanzen mit einem Spin von 2, die Vektorboson-Paare erzeugen können.

Am Large Hadron Collider erwarten wir für solche Modelle Abweichungen im Spektrum der gemessenen kombinierten – auch invarianten – Masse von Vektorboson-Paaren (Abb. 5). Das Untergrundspektrum der Prozesse des Standardmodells fällt zu großen Massen hin stark ab, sodass neue Teilchen sich als Resonanzen auf dem

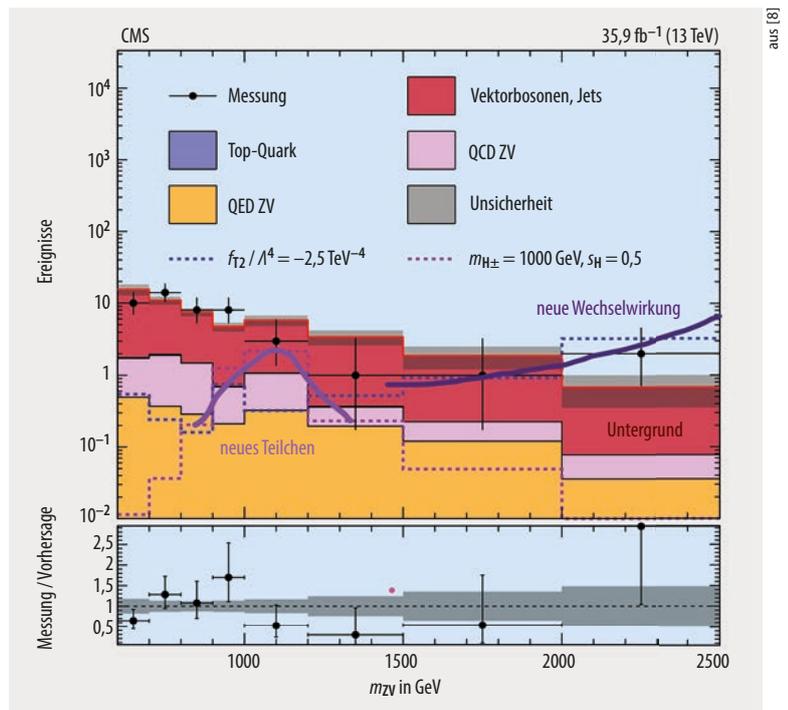


Abb. 5 Im gezeigten Beispiel ergibt sich die invariante Masse aus einem als Jet rekonstruierten W- oder Z-Boson und einem aus zwei Leptonen rekonstruierten Z-Boson. Für die Beiträge zum Untergrund (farbige Flächen) sagt das Standardmodell ein fallendes Spektrum voraus. Neue unbekannte Austauschteilchen zeigen sich als Resonanzen auf dem Untergrund – hier ein neues geladenes Higgs-Boson (lila). Neue unbekannte Wechselwirkungen führen zu Abweichungen bei hohen Energien – hier als Beispiel eine anomale Vier-Bosonen-Kopplung (dunkellila).

Untergrund beobachten lassen. Sollten die Resonanzen jenseits der am Large Hadron Collider erreichbaren Energien liegen, können auch nicht-resonante Abweichungen des Spektrums der invarianten Masse auftreten: Ein Beispiel ist ein Anstieg am Ende des Spektrums, der auf neue Wechselwirkungen hinweisen würde.

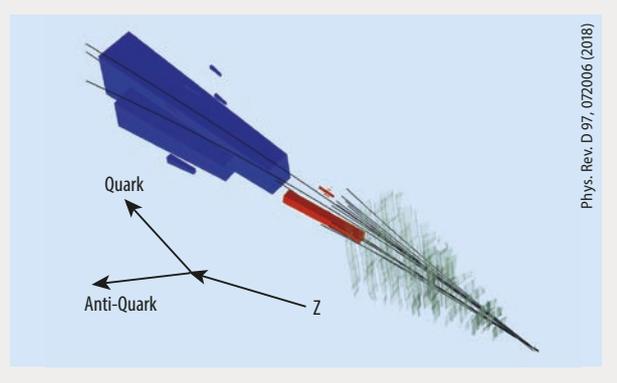
Auf der Suche nach neuen Austauschteilchen

Entsprechend erfolgt die Suche nach neuen Austauschteilchen, indem in der invarianten Masse von Vektorboson-Paaren nach Resonanzen gesucht wird [6]. Am sensitivsten ist das bei hohen Massen möglich, wo der Untergrund

Rekonstruktion hochenergetischer Vektorbosonen

Vektorbosonen können in ein Quark-Antiquark-Paar zerfallen; die Quarks lassen sich als kollimierte Teilchenschauer, sog. Jets, nachweisen. Dabei entspricht die invariante Masse des Jet-Paares derjenigen des Vektorbosons. Bei Vektorbosonen mit großer Geschwindigkeit erreichen ihre Zerfallprodukte den Detektor in sehr kleinem Winkelabstand, sodass sich die beiden Jets nicht mehr klar separieren lassen.

Um solche Ereignisse vom Untergrund bestehend aus einfachen Quark- oder Gluon-Jets zu separieren, gibt es spezielle Techniken, welche die Substruktur der Jets analysieren [7]. Sogenannte Jet-Grooming-Methoden rekonstruieren den Zerfallsbaum in Jets, um den Zerfall eines schweren Teilchens – hier des Vektorbosons Z – zu separieren. Neueste Messungen nutzen auch Maschinelles Lernen, um die Substruktur zu untersuchen.



stark abfällt. Besonders häufig sollten Prozesse auftreten, in denen eines oder beide Vektorbosonen in Quark-Antiquark-Paare zerfallen und dabei Jets mit einer spezifischen Substruktur bilden (Infokasten „Rekonstruktion hochenergetischer Vektorbosonen“). Als Veranschaulichung dient das invariante Massenspektrum eines Jets (Abb. 5), dessen gemessene Substruktur konsistent ist mit der von W- oder Z-Bosonen und einem aus zwei Leptonen rekonstruierten Z-Boson. Hier lassen sich Resonanzen in Kanälen mit Jets mit einer Auflösung von 5 bis 10 Prozent rekonstruieren.

Die Daten aus Run 1 am Large Hadron Collider bei einer Schwerpunktsenergie von 7 bis 8 TeV lieferten erste Hinweise auf eine mögliche Resonanz bei einer Masse von $2 \text{ TeV}/c^2$ [2]. Bereits die kombinierte statistische Auswertung aller relevanten Kanäle mit den ersten Daten aus Run 2 falsifizierte diese Vermutung. Die sensitivsten Suchen basierend auf dem gesamten Datensatz von Run 2 schließen inzwischen neue Resonanzen mit Spin 1 bei Massen bis zu $4,3 \text{ TeV}/c^2$ aus. Da die statistische Kombination aller Kanäle von beiden Experimenten in diesem Datensatz noch aussteht, ist das Entdeckungspotenzial von Run 2 noch nicht vollständig ausgeschöpft.

Neuen Wechselwirkungen auf der Spur

Effektive Feldtheorien nutzen zusätzliche sogenannte anomale Kopplungen zwischen den Teilchen des Standardmodells, um den Einfluss bisher unbekannter Kräfte zu beschreiben. In der Vektorboson-Streuung verändert dies die Kopplungen von vier Bosonen. Die zusätzlichen Mög-

lichkeiten modifizieren das invariante Massenspektrum von den mittleren bis zu den höchsten Massen (Abb. 5).

Die Analyse der Daten aus Run 2 schließt bereits Kopplungen größer als $0,1 \text{ TeV}^{-4}$ aus; das entspricht neuen Wechselwirkungen, die auf Längenskalen wirken, die 2000-mal kleiner als der Protonenradius sind. Die Stärke potenzieller neuer Kräfte in der Vektorboson-Streuung ist damit auf der TeV-Skala bereits stark eingeschränkt, obwohl die Auswertung des gesamten Datensatzes noch läuft. Auch hier gibt es noch Potenzial für Entdeckungen.

Blick in die Zukunft

Neben den Prozessen der Vektorboson-Streuung sind auch solche interessant, bei denen mehr als zwei Bosonen entstehen, da sie ebenfalls sensitiv auf Vier-Bosonen-Kopplungen sind (Abb. 4c). Zuletzt gelang es der CMS-Kollaboration, erstmals die gleichzeitige Produktion von drei schweren Vektorbosonen nachzuweisen [9]; 2021 hat auch die ATLAS-Kollaboration die Produktion von drei W-Bosonen beobachtet. Daher besteht die Hoffnung, diese Prozesse in den kommenden Jahren präzise zu vermessen.

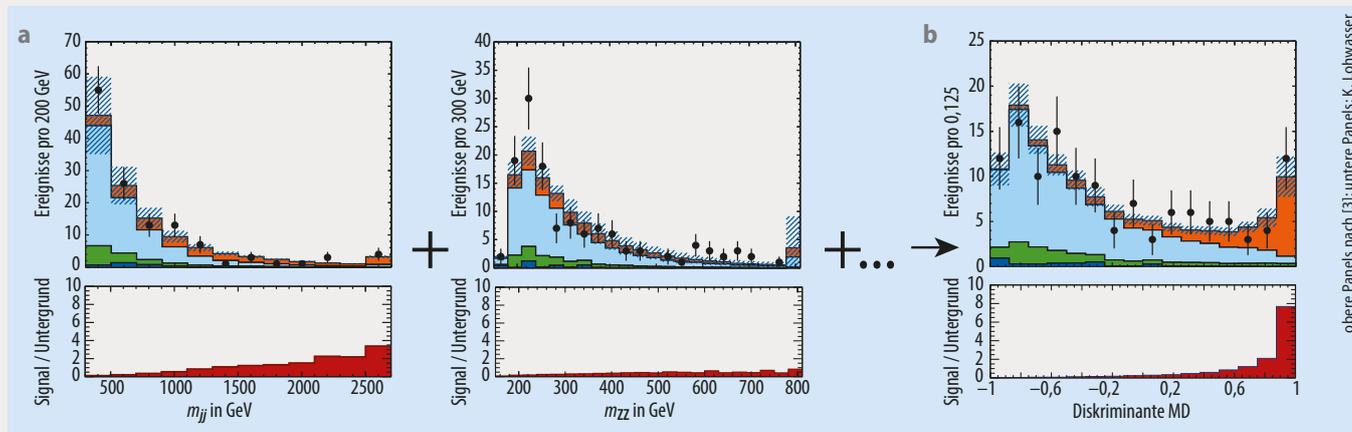
Über den ersten Nachweis hinaus diente der Prozess $W^\pm W^\pm \rightarrow W^\pm W^\pm$ aufgrund seiner relativen Häufigkeit bereits dazu, die Polarisationszustände der W-Bosonen zu untersuchen [10]. Analog zu Lichtwellen, die als Photonen im Standardmodell vorkommen, treten auch bei W- und Z-Bosonen mehrere Polarisationszustände auf. Die CMS-Kollaboration benutzt eine Diskriminante, für die Maschinelles Lernen verschiedene Observablen wie die invariante

Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen spielt eine große Rolle beim Nachweis der Vektorboson-Streuung, weil Untergrundprozesse mit mehreren Bosonen dieser zum Verwechseln ähnlich sehen. Fast alle Messungen destillieren die kleinen Unterschiede zwischen Signal und Untergrund in eine Zahl, die beschreibt, wie gut einzelne Ereignisse dem Signal oder dem Untergrund ähneln. Diese Diskriminante liegt

zwischen -1 (Untergrund) und $+1$ (Signal). Sie separiert Signal und Untergrund besser als einfache Observablen (Abb.), insbesondere bei der Messung von Vektorboson-Streuung mit ZZ-Endzuständen. Die relativ kleinen Unterschiede von Signal und Untergrund erschweren es hier, eine reine Stichprobe von Signalereignissen auszuwählen beispielsweise auf Basis der kombinierten oder

invarianten Masse der beiden Jets. Erst in Kombination mit weiteren Eigenschaften der Vektorboson-Streuung ergibt sich eine leistungsfähige Diskriminante. Dazu gehört, wie weit die Jets in verschiedenen Detektor-Hemisphären voneinander entfernt liegen und ob die Zerfalls-Leptonen im Durchschnitt größere Transversalimpulse besitzen.



Beim Vergleich der Daten für einzelne Observablen (a, oben, schwarz) mit den vorhergesagten Beiträgen von Signal (orange) und Untergrund (farbige Balken) fällt auf, dass das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis (unten) immer weniger als 4 beträgt. Erst die Kombination mehrerer Observablen mittels maschinellen Lernens in eine multivariate Diskriminante (b) erlaubt es, das Signal zu isolieren und ein Verhältnis größer 7 zu erreichen.

Masse der Leptonen und die der Jets kombiniert. Diese Diskriminante erlaubt es, den Anteil longitudinal und transversal polarisierter Bosonen zu extrahieren. Damit gelang es, einen Schritt zum Nachweis der Existenz von mindestens einem longitudinal-polarisierten W-Boson in der Vektorboson-Streuung zu erbringen. Das Ergebnis ist allerdings noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 1,1 Prozent behaftet, dass es sich nur um einen Zufall handelt.

Die Untersuchung der Vektorboson-Streuung steht damit gerade erst am Anfang und verlangt nach einer präziseren Vermessung am High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC). Dieses Upgrade soll bis 2040 einen 20-mal größeren Datensatz liefern als bisher aufgezeichnet. Mit dem Einsatz neuer Detektoren, weiteren Entwicklungen bei der theoretischen Beschreibung und den Auswertungsmethoden erscheint der Nachweis der Vek-

torboson-Streuung mit zwei longitudinal-polarisierten W-Bosonen möglich. Dieser umfangreiche Datensatz sollte es außerdem ermöglichen, wesentlich seltener auftretenden neuen Wechselwirkungen jenseits des Standardmodells auf die Spur zu kommen.

Literatur

- [1] *ATLAS Coll.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 141803 (2014)
- [2] *ATLAS Coll.*, JHEP **12**, 055 (2015)
- [3] *ATLAS Coll.*, akzeptiert von Nat. Phys., arXiv:2004.10612 (2020)
- [4] *R. Covarelli, M. Pellen und M. Zaro*, Int. J. Mod. Phys. A **36**, 2130009 (2021)
- [5] *A. Denner und T. Hahn*, Nucl. Phys. B **525**, 27 (1998)
- [6] *T. Dorigo*, Prog. Part. Nucl. Phys. **100**, 211 (2018)
- [7] *R. Kogler et al.*, Rev. Mod. Phys. **91**, 045003 (2019)
- [8] *CMS Coll.*, Phys. Lett. B **798**, 134985 (2019)
- [9] *CMS Coll.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 151802 (2020)
- [10] *CMS Coll.*, Phys. Lett. B **812**, 136018 (2021)

Die Autor:innen



Andreas Hinzmann (FV Teilchenphysik) sucht nach Physik jenseits des Standardmodells und nach experimentellen Techniken, um die Jet-Substruktur zu verstehen. An der U Hamburg leitet er da-

zu seit 2017 eine Emmy Noether-Nachwuchsgruppe. Er studierte Physik an der RWTH Aachen und promovierte dort mit einer Arbeit am LHC. Danach war er CERN-Fellow und Postdoc an der U Zürich in der Schweiz.

Dr. Andreas Hinzmann, Universität Hamburg, Institut für Experimentalphysik, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg, **Dr. Alexander Huss**, CERN, Esplanade des Particules 1, 1211 Genf 23, Schweiz, und **Dr. Kristin Lohwasser**, Department of Physics and Astronomy, F25, Hicks Building, Hounsfield Road, Sheffield S3 7RH, Großbritannien



Alexander Huss arbeitet als theoretischer Physiker am CERN an Präzisionsrechnungen für Prozesse des Standardmodells, die in Beschleuniger-Experimenten auftreten. Nach der Promotion an der

U Freiburg führte ihn sein Weg als Postdoktorand zur ETH Zürich und für ein CERN-Fellowship nach Genf. Nach einer Assistenzprofessur an der U Durham, England, kehrte er zurück in die Theoriegruppe des CERN.



Kristin Lohwasser (FV Teilchenphysik) arbeitet für die ATLAS-Kollaboration und das VBSCan-Netzwerk daran, Vektorboson-Streuung zu messen und zu interpretieren. Seit 2017 leitet sie mit

einem ERC Starting Grant ihre eigene Gruppe an der U Sheffield, England. Sie studierte Physik an der U Dortmund und promovierte an der U Oxford. Weitere Stationen waren die U Freiburg und DESY in Zeuthen.

Vakuumtechnik

PiNK[®]



Doppelkammer-Prüfanlage mit integrierter Heliumrückgewinnung, Helium-Prüfdruck: 180 bar, Prüfkammervolumina: 710 l, Konstante Taktzeit: 30 s, Messempfindlichkeit: $5,0 \times 10^{-7}$ mbar l/s

Helium-Dichtheitsprüfanlagen

PiNK konstruiert und produziert Helium-Dichtheitsprüfanlagen als maßgeschneiderte Lösungen nach Kundenanforderung. Die Anlagen werden für Lecktests unterschiedlichster Systeme, Produkte oder Komponenten eingesetzt und sind je nach Anforderung für den teil- oder vollautomatisierten Betrieb ausgelegt.

- Helium-Leckraten bis 10^{-9} mbar x l x sec⁻¹, Prüfdruck bis 300 bar
- Teil- oder vollautomatisiert, mit Roboterbestückung/Materialflussanbindung
- Erweiterung auf Gasmischstation und Testgas-Rückgewinnungssystem möglich
- Speicherprogrammierbare Steuerung, Visualisierung und Datendokumentation
- Fernwartung, 24-h-Support