

Neustart des LHCb-Experiments

Mit B-Mesonen auf der Suche nach neuer Physik

ALEX SEUTHE | JOHANNES ALBRECHT

Untersuchungen von B-Meson-Zerfällen in der Hochenergiephysik bilden zurzeit einen Fokus der Forschung am LHCb-Experiment. Der nach einer maßgeblichen Überarbeitung kürzlich wieder gestartete Teilchendetektor soll neues Licht auf diese Prozesse werfen.

Das Standardmodell der Teilchenphysik [1–3] ist ein Paradebeispiel unter den Theoriegebäuden der heutigen Physik. Es sagt mit sehr hoher Präzision das Verhalten der fundamentalen Bausteine der Materie voraus und beschreibt drei der vier Grundkräfte der Natur. Dabei handelt es sich um die schwache und die starke Wechselwirkung sowie um die elektromagnetische Kraft. Die Gravitationskraft wird nicht in der Theorie des Mikrokosmos beschrieben, sondern separat durch die allgemeine Relativitätstheorie. Eine Vereinheitlichung der beiden Theoriegebäude ist bislang nicht gelungen.

In der Teilchentheorie werden alle Kräfte durch den Austausch von Bosonen dargestellt. Bosonen sind Teilchen mit ganzzahligem Spin. Die Teilchen mit halbzahligem Spin werden als Fermionen bezeichnet und im Standardmodell in Quarks und Leptonen unterteilt. Diese unterscheiden sich durch ihre Ladungen und ihre Massen. So sind beispielsweise die drei geladenen Leptonen innerhalb der Theorie bis auf ihre Massen identische Kopien voneinander. Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks, das bekannteste Beispiel für ein Lepton ist das Elektron. Mit der Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012 [4, 5] sind alle innerhalb des Standardmodells vorhergesagten fundamentalen Teilchen experimentell bestätigt worden. Jedoch kann bei Weitem nicht von einem Abschluss der Teilchenphysik gesprochen werden. Große Fragen bleiben weiterhin offen.

Aus kosmologischen Beobachtungen ist beispielsweise bekannt, dass die sichtbare Materie nur einen kleinen Teil des Energie- und Materiegehalts des Universums ausmachen kann. Bislang existieren in der Teilchenphysik keine

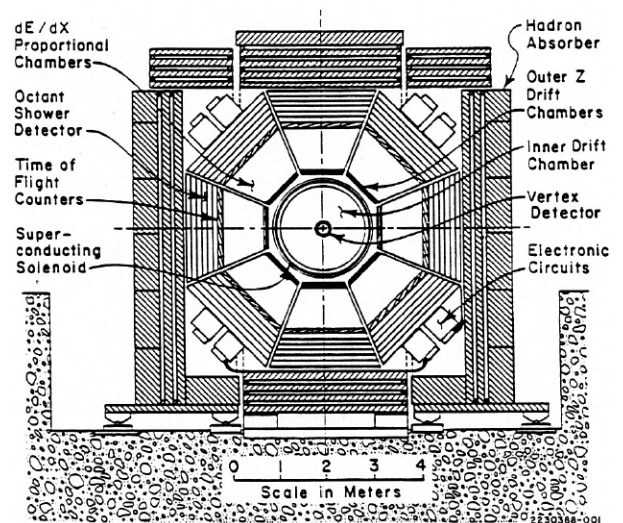


Abb. 1 Erstmals nachgewiesen wurden B-Mesonen mit dem CLEO-Detektor. Die B-Mesonen wurden in Elektron-Positron-Kollisionen über eine $\Upsilon(4S)$ -Zwischenresonanz erzeugt. Dargestellt ist ein Querschnitt durch den zwiebelartigen Aufbau des Detektors um die sich mittig befindende Strahlröhre (Quelle: D. R. Perticone, 1988. *Production and decay of charmed mesons in the epsilon energy region*. Cornell University).

experimentellen Nachweise von Teilchen, welche die Dunkle Materie und Dunkle Energie erklären könnten. Ebenfalls gibt es bis heute keine etablierte und experimentell bestätigte Theorie zur Erklärung der beobachteten Materie-Antimaterie-Asymmetrie im sichtbaren Universum. Im Urknall sind Materie und Antimaterie zu gleichen Teilen produziert worden, jedoch besteht unsere Welt heute fast ausschließlich aus Materie. Weiterhin steht auch das Standardmodell selbst vor großen offenen Fragen, beispielsweise nach dem Ursprung der völlig unterschiedlichen Teilchenmassen.

Präzisionsmessungen testen das Standardmodell

Eine Vielzahl von möglichen theoretischen Erweiterungen und Modifikationen des Standardmodells versucht, diese Rätsel zu lösen. Diese gehen meistens mit veränderten Kopplungsstärken zwischen Teilchen und Kräften einher oder postulieren neue Teilchen. Manche sagen sogar neue

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

fundamentale Kräfte vorher. In der Naturwissenschaft muss jedoch immer eine stringente experimentelle Bestätigung dieser Vorhersagen erfolgen, um von einer neuen Entdeckung sprechen zu können. Methodologisch gesprochen unterscheidet die moderne Teilchenphysik dabei zwischen zwei Klassen von experimentellen Ansätzen.

Einerseits wird direkt nach neuen Teilchen gesucht, welche beispielsweise in den hochenergetischen Kollisionen der großen Teilchenbeschleuniger produziert werden. Diese Art von Messungen nennt man *direkte Suchen* nach neuer Physik. Der Nachweis des Higgs-Bosons war der bis heute letzte große Erfolg dieser Methode auf der Suche nach neuen fundamentalen Teilchen. Dieser direkte Ansatz ist also seit dieser Entdeckung noch nicht wieder erfolgreich bei der Entdeckung neuer, unbekannter Teilchen gewesen. Direkte Suchen haben eine maßgebliche Einschränkung: Es können nur Teilchen mit einer bestimmten maximalen Masse produziert werden. Bei Beschleunigerexperimenten entspricht diese Masse dem Äquivalent der maximalen Beschleunigerenergie. Das Higgs-Teilchen wurde jedoch bereits Jahre vor seiner direkten Entdeckung indirekt vorhergesagt.

Die *indirekte Suche* nach neuer Physik folgt dabei einem anderen Schema: Hier werden bereits bekannte Teilchenzerfälle untersucht. Mögliche experimentell nachge-

wiesene Abweichungen von theoretischen Vorhersagen – etwa bei den Häufigkeiten von Zerfallskanälen – können auf neue Physik hinweisen. Hier kommen mögliche neue Teilchen auf andere Weise ins Spiel. Denn sie können als virtuelle Teilchen eine Rolle spielen, die als Zwischenzustände innerhalb eines Prozesses als Quantenfluktuationen auftreten könnten, aber nicht direkt nachgewiesen werden. Die Masse dieser virtuellen Teilchen ist nicht direkt durch die maximale Beschleunigerenergie limitiert. Damit lassen sich potenziell auch schwerere neue Teilchen nachweisen, die aktuell nicht in den direkten Suchen sichtbar wären. Für die dabei notwendigen theoretischen Vorhersagen gilt: Da das Standardmodell eine Vielzahl von nur experimentell determinierten Parametern beinhaltet, die von der Theorie nicht bestimmt sind, müssen diese Parameter zuerst so präzise wie möglich gemessen werden. Damit werden anschließend theoretische Vorhersagen ausgewählter bekannter Prozesse berechnet und mit den experimentellen Messungen verglichen. Hierbei werden physikalische Prozesse untersucht, die dafür bekannt sind, besonders sensitiv auf potenzielle neue Physik zu sein.

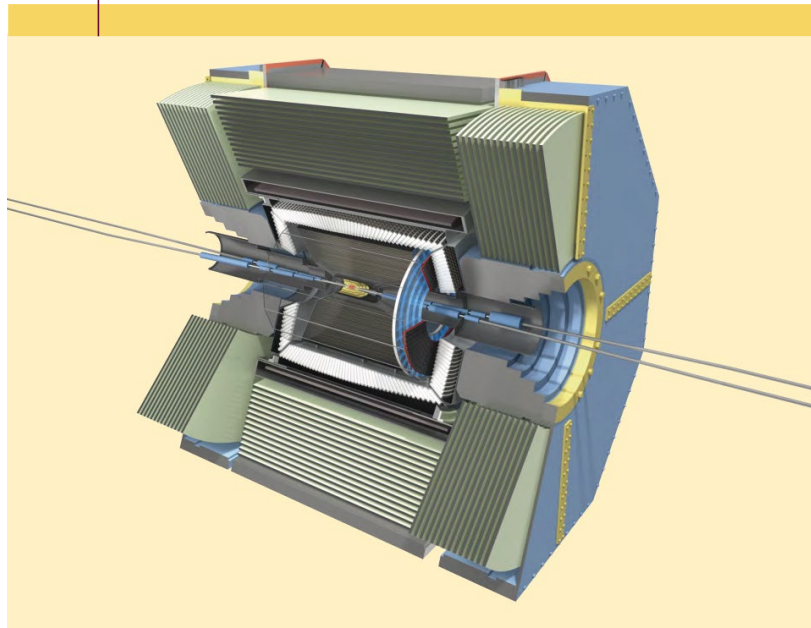
Präzisionsphysik mit B-Mesonen

Für indirekte Suchen eignen sich Messungen mit B-Mesonen hervorragend. Diese bestehen aus zwei Quarks. Eines



Abb. 2 Mit dem ARGUS-Detektor am DESY wurden später weitere Eigenschaften der B-Mesonen untersucht, beispielsweise die Mischung neutraler B-Mesonen. Die Abbildung zeigt das Abschlussbild der ARGUS-Kollaboration 2004 vor dem Abbau des Detektors. Vorne ganz links ist der spätere Dortmunder Professor Bernhard Spaan zu sehen.

ABB. 3 | BELLE-2-EXPERIMENT



Mit dem Belle-2-Experiment am japanischen Forschungszentrum KEK werden heute B-Mesonen untersucht, die aus Elektron-Positron-Kollisionen stammen. Der Detektor deckt den gesamten Raumwinkel um die Kollisionen ab. Das Belle-2-Experiment ist den sogenannten B-Fabriken zuzuordnen, da der experimentelle Aufbau speziell zur Produktion und Untersuchung von B-Mesonen konzipiert wurde (Quelle: Belle-2-Kollaboration).

davon ist das namensgebende b-Quark, wobei b für „beauty“ steht, im Gegensatz zu seinem Geschwisterteilchen aus der dritten Generation von Quarks, dem noch schwereren t- oder top-Quark. Die Zusammensetzung von B-Mesonen ist von experimentellem Vorteil, da das b-Quark das zweit-schwerste Quark ist und damit in alle anderen leichteren Quarks zerfallen kann. So kann man eine Vielzahl von möglichen Zerfallsprozessen nachweisen. Einige dieser Zerfälle sind im Standardmodell sehr selten und daher sensitiv für kleine Effekte potenzieller neuer Physik. Zudem ist im Vergleich zum zwar schwereren, aber extrem kurzlebigen t-Quark die Lebensdauer der b-Quarks ausreichend lang, sodass überhaupt gebundene Zustände mit anderen Quarks gebildet werden können. Die relativ lange Lebensdauer ermöglicht außerdem eine präzise Untersuchung der B-Mesonen, und die hohe Masse erlaubt theoretische Berechnungen mit einer großen Präzision. Denn Prozessanteile, die auf niedrigeren Energieskalen ablaufen, können somit in den Berechnungen separiert werden. Diese Kombination von Eigenschaften macht B-Mesonen zu idealen Kandidaten für hochpräzise Tests des Standardmodells.

Indirekte Suchen nach neuer Physik mit B-Mesonen ermöglichen einen vielversprechenden Zugang zum Verständnis der Struktur der Teilchenfamilien (die Teilchenart wird auch „Flavour“ genannt) sowie zum Ursprung der Quark- und Leptonmassen. In den letzten Jahren aufgekommene Anomalien im Bereich der Flavour-Physik mit B-Mesonen machen Untersuchungen dieser Art besonders span-

nend. Prozesse mit b-Quarks werden zudem derzeit in verschiedenen Experimenten untersucht, weshalb sich das Feld nicht auf einen einzelnen experimentellen Ansatz reduziert.

Teilchenbeschleuniger und Detektoren

Um die Eigenschaften der fundamentalen Teilchen systematisch experimentell zu untersuchen, sind hohe Energien zu deren Produktion notwendig. Während die Teilchenphysik solche Energien anfangs nur in natürlich vorkommenden Prozessen wie der kosmischen Strahlung nutzen konnte, wurden in den letzten Jahrzehnten große Teilchenbeschleuniger gebaut, die geladene Teilchen auf sehr hohe Energien beschleunigen und zur Kollision bringen. Bei diesen Teilchen handelt es sich üblicherweise um Elektronen beziehungsweise Positronen oder (Anti-)Protonen. Teilchendetektoren untersuchen und vermessen die bei den Kollisionen entstehenden Zerfallsprodukte. Unser Untersuchungsobjekt, das b-Quark, wurde 1977 mit dem Nachweis von Teilchen bestehend aus einem b- und einem Anti-b-Quark am Fermilab in den USA entdeckt [6]. 1983 wurden die aus einem b-Quark und einem weiteren leichteren Quark bestehenden B-Mesonen am CLEO-Detektor an der Cornell University ebenfalls in den USA zum ersten Mal nachgewiesen [7]. Abbildung 1 zeigt den Querschnitt des CLEO-Detektors, dessen Detektorkomponenten sich zwiebelförmig um den Kollisionspunkt anordnen.

Wichtige Eigenschaften der B-Mesonen wurden später am ARGUS-Experiment am Forschungszentrum DESY in Hamburg bestimmt. Abbildung 2 zeigt das ARGUS-Experiment, bei dem bereits unsere Dortmunder Gruppe unter damaliger Leitung von Professor Dietrich Wegener maßgeblich beteiligt war. Im Jahre 1999 gingen die beiden sogenannten B-Fabriken am KEKB-Beschleuniger im japanischen Tsukuba sowie PEP-II-Beschleuniger am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in den USA in Betrieb. Die zugehörigen Detektoren sind der Belle-Detektor bei KEKB und der BaBar-Detektor am SLAC. Diese waren bis 2010 beziehungsweise 2008 in Betrieb. Als Nachfolger des Belle-Experiments begann das Belle-2-Experiment 2018 mit der Datennahme, das schematisch in Abbildung 3 gezeigt ist (siehe auch Physik in unserer Zeit 2019, 50(3), 132). Bei den drei letztgenannten Experimenten werden Elektronen und Positronen mit einer fest definierten Energie zur Kollision gebracht, sodass gezielt B-Mesonen über den Zerfall einer Zwischenresonanz produziert werden.

Durch diese sehr kontrollierte experimentelle Umgebung lassen sich die Zerfalleigenschaften der B-Mesonen hochpräzise bestimmen. Jedoch ist die Anzahl der produzierten Mesonen durch die Konzeption als Elektron-Position-Beschleuniger limitiert. Im Gegensatz dazu ist bei der Kollision von Protonen das Verhalten der Zerfallsprodukte deutlich weniger kinematisch determiniert, da Protonen aus mehreren Quarks und Gluonen zusammengesetzt sind. Die Anzahl der hierbei produzierten B-Mesonen ist jedoch deutlich höher. Der heute leistungsstärkste Teilchenbeschleu-

niger ist der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in der Schweiz. Hier untersucht das LHCb-Experiment unter anderem das Verhalten von B-Mesonen, die bei Proton-Proton-Kollisionen erzeugt wurden. Das LHCb-Experiment hat bei der jüngsten Betriebspause ein maßgebliches Upgrade erhalten. Deshalb planen wir in der aktuellen Phase der Datennahme, dem Run 3, den größten Datensatz von Zerfällen von B-Mesonen aller Zeiten aufzuzeichnen und zu vermessen. Abbildung 4 zeigt einen seitlichen Querschnitt des überarbeiteten LHCb-Detektors. Unsere Dortmunder Arbeitsgruppe hat dabei maßgeblich an der Konstruktion und Fertigung des SciFi-Detektors zur Spurfindung mitgewirkt. Das ATLAS- und CMS-Experiment am LHC führen ebenfalls seit einigen Jahren Untersuchungen mit B-Mesonen durch.

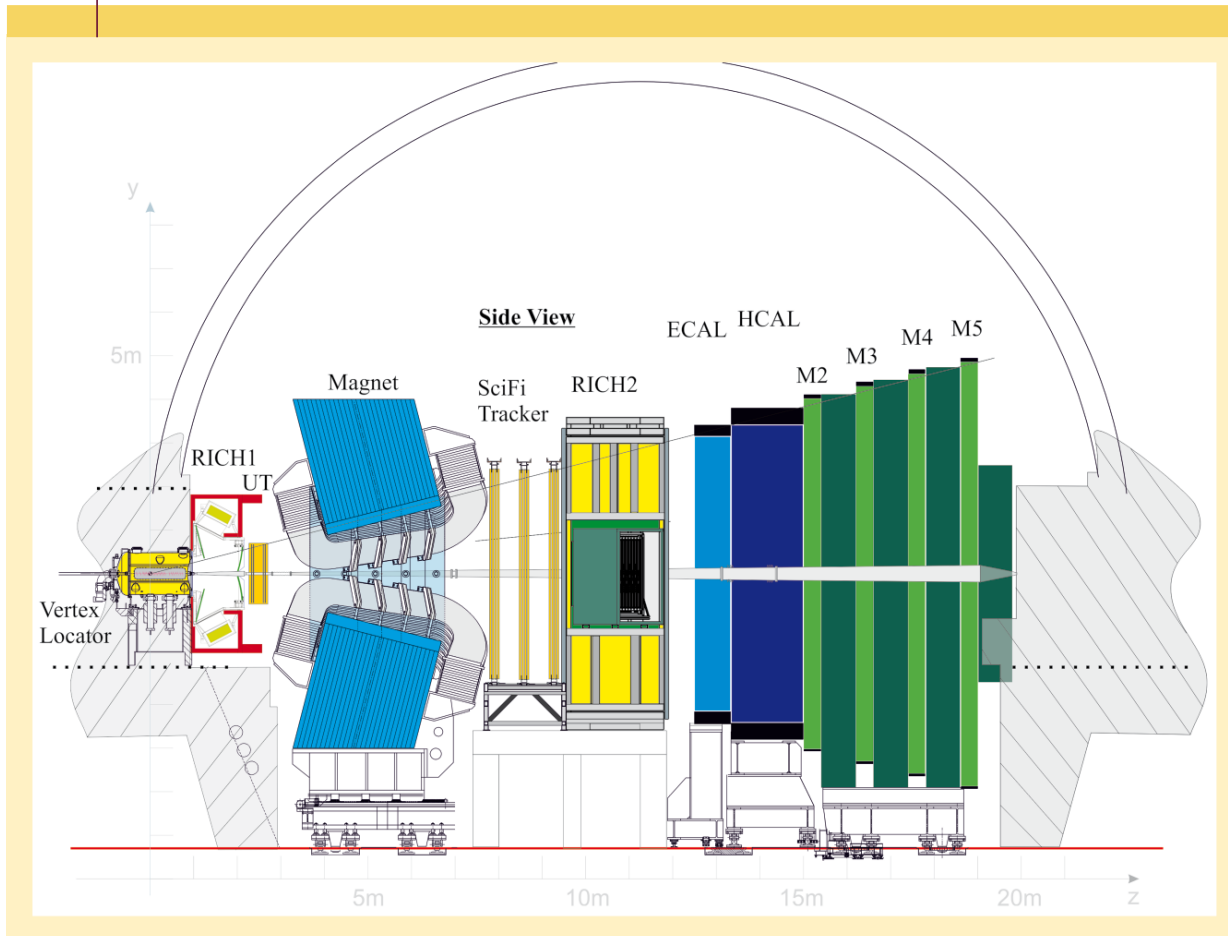
Flavour-Physik mit B-Mesonen

Um mit seltenen Zerfällen von B-Mesonen nach neuer Physik zu suchen, braucht man präzise theoretische Vorschläge. Diese werden gemäß dem Standardmodell be-

rechnet. Das Standardmodell beinhaltet jedoch 19 Parameter, die nur experimentell bestimmt und nicht voneinander abgeleitet werden können. Dies sind unter anderem die Massen der sechs Quarks und der drei geladenen Leptonen. Besonders wichtig für die Beschreibung der Teilchenzerfälle sind auch die Übergänge zwischen einzelnen Quark-Typen, zum Beispiel, wenn ein b-Quark in ein leichteres Quark zerfällt. Die nach ihren Urhebern benannte Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, kurz CKM-Matrix [8, 9], beschreibt die Wahrscheinlichkeit dieser Übergänge.

Für die Aufstellung der CKM-Matrix wurde 2008 der Nobelpreis für Physik an Kobayashi und Maskawa verliehen. Sie kann durch drei Parameter sowie eine komplexe Phase parametrisiert werden. Die komplexe Phase ist dabei ein Ausdruck für die sogenannte CP-Verletzung. CP-Verletzung bedeutet, dass Zerfälle, bei denen die Teilchen durch Antiteilchen ausgetauscht werden (C-Transformation) und die räumlichen Koordinaten gespiegelt werden (P-Transformation), nicht symmetrisch zu den so transformierten Originalzerfällen ablaufen.

ABB. 4 | DER NEUE LHCb-DETEKTOR



Seitenansicht des LHCb-Detektors mit verschiedenen Detektorkomponenten. Die Protonenpakete werden innerhalb des Vertex Locators (links) zur Kollision gebracht. Zerfallsprodukte werden in (von links nach rechts) Upstream-Tracker (UT), Tscherenkow-Detektoren (RICH1 und -2), einem Spurdetektor (SciFi-Tracker), dem Kalorimetersystem (ECAL und HCAL) sowie dem Myonensystem (M2-5) nachgewiesen (Quelle: LHCb-Kollaboration).

Diese Parameter werden – zum Beispiel beim LHCb-Experiment – präzise in Messungen bestimmt. Natürlich kann man solche Parameterbestimmungen auch als Suche nach neuer Physik ansehen: Falls die gemessenen Parameter signifikant von den bekannten Werten abweichen, könnte dies ein Hinweis auf neue Effekte sein. Jedoch gibt es derzeit keine klaren Abweichungen dieser Art.

Wichtige Messgrößen

Bei der Beschreibung von Teilchenzerfällen von B-Mesonen sind drei Klassen von Messgrößen besonders relevant. Bei der ersten geht es um die Berechnung von Verzweigungsverhältnissen. Hierbei wird theoretisch vorhergesagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein B-Meson in bestimmte andere Teilchen zerfällt. Diese Wahrscheinlichkeit berechnet man relativ zur Gesamtwahrscheinlichkeit, dass das instabile Teilchen zerfällt. Dies nennt man das Verzweigungsverhältnis, mit dem Formelzeichen B für englisch „branching ratio“. Die theoretischen Berechnungen hierzu haben signifikante Unsicherheiten, die beispielsweise durch die empirischen Daten oder Besonderheiten der störungstheoretischen Kalkulationen zustande kommen. Diese Berechnungen werden beispielsweise für die Zerfälle eines positiv geladenen B-Mesons in ein Kaon und ein Myon-Antimyon-Paar beziehungsweise ein Elektron-Positron-Paar ($B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ und $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$) durchgeführt. Dabei steht das B^+ für ein geladenes B-Meson und das K^+ für ein geladenes Kaon. Bei diesen Prozessen, auf die wir weiter unten genauer eingehen, zerfällt das b-Quark zu einem strange-Quark (s-Quark), wie es in Kaonen enthalten ist.

Zweitens ist es möglich, Winkelverteilungen zwischen den einzelnen Zerfallsprodukten vorherzusagen. Hierbei kann man die theoretisch berechneten Variablen so konstruieren, dass Unsicherheiten in der Berechnung reduziert werden. Es handelt sich hierbei jedoch um sehr komplexe Messungen, die eine große Anzahl gemessener Zerfälle benötigen.

Eine dritte Kategorie sind Verhältnisse von Verzweigungsverhältnissen. Diese haben einen ähnlichen Vorteil wie die konstruierten Winkelvariablen. Denn bei ihnen kürzen sich in den Verhältnissen theoretische Unsicherheiten

zu einem großen Teil heraus. Das prominenteste Beispiel in der aktuellen B-Physik ist das Verhältnis, welches mit den beiden oben genannten Zerfällen $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ und $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$ gebildet wird und mit R für „ratio“ abgekürzt wird. Die Formel für dieses Verhältnis ergibt sich damit zu

$$R_K = \frac{B(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{B(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)} \quad (1)$$

[10]. Die theoretischen Unsicherheiten kürzen sich dabei besonders gut heraus, da die Zerfälle im Zähler wie im Nenner nahezu identisch sind. Lediglich die Art der Leptonen ist unterschiedlich. Es handelt sich dabei im einen Fall um Myonen, im anderen Fall um Elektronen.

Anomalien am LHCb-Experiment

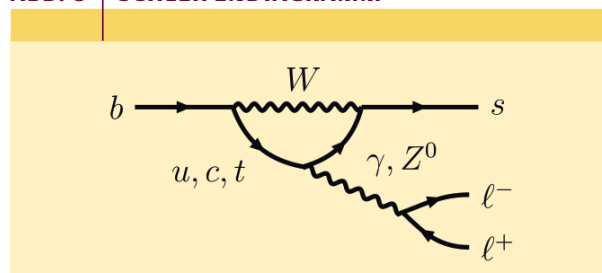
Diese drei verschiedenen Klassen von Messgrößen lassen sich nun mit verschiedenen Zerfällen vermessen. Dies sind zum einen die seltenen Zerfälle vom Typ $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$, wobei das b-Quark als ein b-Hadron auftritt – also ein gebundener Zustand mit einem b-Quark – und das s-Quark mit mindestens einem weiteren Teilchen ebenfalls einen gebundenen Zustand bildet. Die geladenen Leptonen im Zerfall sind hier mit ℓ für ein Elektron oder Myon gekennzeichnet.

Diese Zerfälle weisen ein geringes Verzweigungsverhältnis auf und sind somit selten im Standardmodell. Begründet ist dies durch die Struktur der Quarkübergänge, wobei ein b-Quark in ein s-Quark unter Emission von zwei geladenen Leptonen übergeht. Dieser Übergang ändert die Art des Quarks, genannt *Flavour*, aber nicht seine elektrische Ladung, die beim s-Quark und b-Quark identisch ist. Diese flavour-ändernden neutralen Ströme sind im Standardmodell unterdrückt, da sie nicht als fundamentale Prozesse auftreten können, sondern nur in Feynman-Diagrammen höherer Ordnung. Die Zerfallsprozesse lassen sich in Zerfallsdiagrammen darstellen, wobei Abbildung 5 ein mögliches Schleifendiagramm des $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ -Übergangs zeigt. Da ein b-Quark bei diesem $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ -Zerfall enthalten ist, bietet diese Kategorie eine – wie oben beschrieben – hervorragende Quelle für die Suche nach neuer Physik.

Es wurden sowohl bei einzelnen Verzweigungsverhältnissen als auch bei Winkelobservablen verschiedener Zerfälle mit $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ -Übergängen schon mehrfach Hinweise auf Abweichungen vom Standardmodell gemessen. Die größte Abweichung findet sich in der 2021 vom LHCb-Experiment veröffentlichten Messung des Verzweigungsverhältnisses des Zerfalls $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ mit 3,6 Standardabweichungen vom Standardmodell [11]. Bei dem ϕ -Teilchen handelt es sich um ein Meson, welches aus einem s- und einem Anti-s-Quark besteht. Allerdings haben sowohl die Messungen der Verzweigungsverhältnisse als auch die der Winkelobservablen signifikante Messunsicherheiten.

Die dritte oben beschriebene Klasse, also Tests der Lepton-Flavour-Universalität, hat im Gegensatz dazu den großen Vorteil, dass sich sowohl theoretische als auch experimentelle Unsicherheiten in der Bestimmung der Verhältnisvariablen zu einem großen Teil aufheben.

ABB. 5 | SCHLEIFENDIAGRAMM

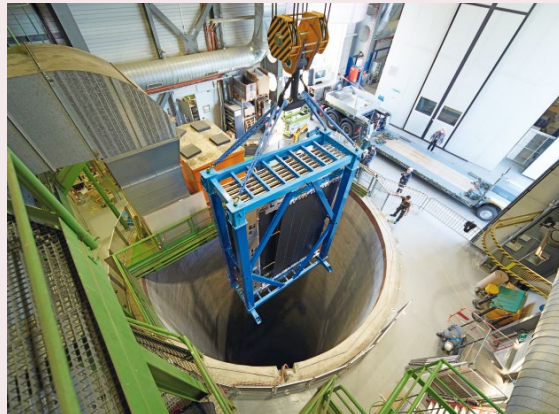


Der Zerfall eines b-Quarks in ein s-Quark und zwei Leptonen ($b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$) kann im Standardmodell nur über seltene Schleifenprozesse stattfinden. Das Zerfallsdiagramm zeigt einen solchen Prozess unter Austausch eines W-Bosons.

UPGRADE DES LHCb-EXPERIMENTS

Der neue LHCb-Detektor ähnelt äußerlich dem vorherigen Aufbau sehr. Er wurde jedoch fast vollständig überarbeitet und mit neuen Detektorkomponenten versehen. Dieser Austausch fand im sogenannten Long Shutdown 2 statt, während dessen der LHC-Beschleuniger ebenfalls überarbeitet wurde. Das LHCb-Experiment befindet sich in einer über 100 m unter der Erdoberfläche liegenden Kaverne. Es untersucht Proton-Proton-Kollisionen. Dank der deutlich erhöhten Kollisionsrate im LHC kann auch der LHCb-Detektor weitaus mehr Daten aufzeichnen als in den vergangenen Jahren.

Um die gestiegene Kollisionsrate und somit auch die höhere Anzahl der Teilchen im Detektor präzise vermessen zu können, besteht der Detektor nun aus folgenden Komponenten (Abbildung 4). Am Interaktionspunkt kommen die Teilchen zur Kollision. Hier werden unter anderem auch die b-Quarks produziert, aus denen die B-Mesonen bestehen. Diese B-Mesonen fliegen typischerweise einige Zentimeter weit, bevor sie zerfallen. Diese Flugstrecke ab dem Kollisionspunkt ist eine spezifische Signatur für diese Teilchen. Der Vertex Locator ist die erste Detektorkomponente und umgibt direkt den Kollisionspunkt. Mit ihm können der Produktionsvertex und der Zerfallsvertex sehr präzise vermessen werden. Um die Art von Zerfallsteilchen zu bestimmen, verfügt das LHCb-Experiment über ein dezidiertes Subdetektorsystem. Dieses besteht unter anderem aus Tscherenkow-Detektoren. Diese weisen das Tscherenkow-Licht nach, das Teilchen mit Überlichtgeschwindigkeit in einem Medium proportional zu ihrer Geschwindigkeit in einem spezifischen Winkel emittieren. Bei bekanntem Impuls kann die Masse und damit die Art des Teilchens ermittelt werden. Der Impuls lässt sich aus der Rekonstruktion von Teilchenspuren im Detektor bestimmen. Diese werden systematisch im Spursystem des Detektors vermessen. Durch einen mehrere Meter großen Magneten im Detektor werden geladene Teilchen proportional zu ihrem Impuls auf gekrümmte Spuren abgelenkt. Der Spurnachweis geschieht mit dem SciFi-



SciFi-Detektor. Die installierten Module des SciFi-Spurdetektors umgeben das Strahlrohr, in dem die Protonen beschleunigt und zur Kollision gebracht werden. Der Detektor wurde unter Beteiligung unserer Dortmunder Arbeitsgruppe im Rahmen des Upgrades des LHCb-Detektors entwickelt und gefertigt. Das Bild zeigt ein zusammengesetztes Modul des Detektors, während es gerade mit einem Kran in die unterirdische Kaverne herabgelassen wird (Quelle: CERN).

Spurdetektor. „SciFi“ steht hier für „Scintillating Fibres“, also szintillierende Fasern. Diese lichtleitenden Fasern emittieren einerseits Licht, wenn Teilchen mit ihnen interagieren, und leiten andererseits dieses Licht zum Nachweis weiter zu Photomultipliern.

Insgesamt werden Datenraten von bis zu vier Terabyte pro Sekunde aus dem Detektor ausgelesen. Diese Daten werden sofort in ein nahes Rechenzentrum geleitet, in dem sie in Echtzeit verarbeitet werden. Dazu wurde die gesamte Software des Experiments neu programmiert.

Hier hat die LHCb-Kollaboration in der Vergangenheit Diskrepanzen mit einer Abweichung von bis zu 3,1 Standardabweichungen ermittelt [12, 13]. Dies konnte jedoch in einer neu durchgeführten Messung des Experiments nicht bestätigt werden. Es handelt sich dabei um eine Untersuchung der Lepton-Flavour-Universalität von Elektronen und Myonen. Dabei wird überprüft, ob die beiden Lepton-Spezies bis auf ihre unterschiedlichen Massen wirklich identische Kopien voneinander sind. Diese Universalität bedeutet ebenfalls, dass Zerfälle mit Elektronen und Myonen im Endzustand bis auf die entsprechenden kinematischen Unterschiede gleich häufig auftreten sollten.

Bei dieser Messung wurden seltene B-Meson-Zerfälle mit den oben eingeführten $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ -Übergängen untersucht. Vereinfacht ausgedrückt wird dabei gemessen, wie häufig ein geladenes B-Meson in ein Kaon und je ein Myon und Antimyon im Vergleich zu einem Kaon und Elektron plus Positron zerfällt. Bis auf kleine Unsicherheiten sagt die theoretische Vorhersage mit sehr hoher Präzision ein Ver-

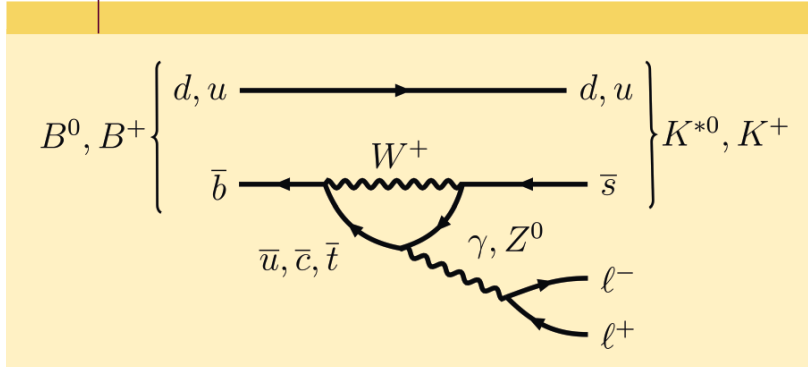
hältnis von 1 voraus. Als Formel mit den entsprechenden Verzweungsverhältnissen ausgedrückt ergibt dies genau die Formel (1) aus dem vorhergehenden Abschnitt.

Abbildung 6 zeigt ein Zerfallsdiagramm für diese Zerfälle. Eine weitere Möglichkeit ist es, neutrale B-Mesonen zu untersuchen. Es handelt sich dann um das Verhältnis

$$R_{K^0} = \frac{B(B^0 \rightarrow K^0\mu^+\mu^-)}{B(B^0 \rightarrow K^0e^+e^-)}.$$

Eine neue Veröffentlichung des LHCb-Experiments, die Ende 2022 am CERN präsentiert wurde und im Preprint-Archiv arXiv einzusehen ist [14, 15], bestimmte in einer zum ersten Mal simultanen Messung die Größen R_{K^0} und R_K . Die unter wesentlicher Beteiligung unserer Dortmunder Arbeitsgruppe durchgeführte Messung beinhaltet dabei den gesamten bisher verfügbaren Datensatz des LHCb-Experiments. Sie liefert die bisher größte Präzision für die gemessenen Variablen und bestimmt diese zum ersten Mal konsistent in zwei verschiedenen Messbereichen. Alle vier damit ermittelten Werte stimmen mit den Erwartungen des

ABB. 6 | ZERFALLSDIAGRAMME FÜR B-MESONEN



Für die Messung der Lepton-Universalitäts-Verhältnisse R_{K^*0} und R_K werden Zerfälle von B-Mesonen in ein Kaon und zwei geladene Leptonen untersucht: $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ und $B^0 \rightarrow K^0 \ell^+ \ell^-$. Die Prozesse finden dabei über $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ -Prozesse statt. Die B-Mesonen werden über ein weiteres sogenanntes Beobachter-Quark, hier ein d- oder u-Quark, gebildet.

Standardmodells überein und ersetzen die vorher bestimmten, stärker vom Standardmodell abweichenden Ergebnisse für die beiden Messgrößen.

Die zweite Klasse von Zerfällen sind sogenannte *semi-leptonische* Zerfälle der Art $B \rightarrow X_c \tau \nu$, wobei B wiederum für ein B-Meson, τ für ein Tau-Lepton und ν für ein Neutrino steht. Das X_c ist ein beliebiges Meson, das ein c-Quark (kurz für Charm-Quark) enthält. Diese Zerfälle sind im Standardmodell nicht weiter unterdrückt und werden somit nicht unter die seltenen Zerfälle subsumiert. Hier findet ein Übergang eines b-Quarks in ein c-Quark unter Emission eines W-Bosons statt.

Parallel zu den $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ -Zerfällen wurden ebenfalls bei der Lepton-Flavour-Universalität Anomalien beobachtet. Untersucht werden dabei, wie oben beschrieben, Zerfälle mit dem Quarkübergang $b \rightarrow c \ell \nu$. Dabei werden die Zerfälle vom Typ $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ verwendet, wobei das D-Meson ein c-Quark enthält und in einer der Messungen auch in einem angeregten Zustand untersucht wird. Verglichen wird dieser Zerfallskanal mit dem gleichen Zerfall, jedoch mit Elektronen oder Myonen im Endzustand anstatt des Tau-Leptons. Dabei treten scheinbar die schwereren Lepto-

nen, also in diesem Falle das Tau-Lepton, bevorzugt auf. Jedoch sind die Unsicherheiten der theoretischen Vorhersagen für diese Kategorie der Messungen deutlich höher als im vorherigen Fall.

Mögliche theoretische Erklärungen

Obwohl experimentell beide Kategorien von Messungen als unabhängig angesehen werden können, gibt es aktuell bereits Ansätze für eine theoretische Erklärung, die diese möglicherweise neuen Phänomene zusammen erklärt. Eine eventuelle Erklärung ist eine Erweiterung des Standardmodells durch sogenannte Leptoquarks. Dies sind neuartige Teilchen, die sowohl mit Leptonen als auch mit Quarks wechselwirken. Sie könnten neue Beiträge innerhalb der Zerfallsprozesse liefern, welche die Anomalien erklären könnten.

Abbildung 7 zeigt solche theoretischen Prozesse mit möglicher neuer Physik. Eine andere mögliche Erklärung liefert die Einführung eines Z' -Austauschbosons, welches eine neue fundamentale Kraft etablieren würde. Interessanterweise werden in manchen theoretischen Modellen diese Erweiterungen des Standardmodells in Verbindung mit möglichen Erklärungen der Dunklen Materie gebracht.

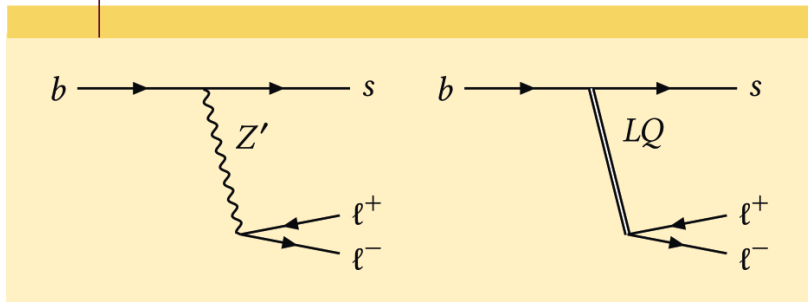
Neue Messungen

Jedoch müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um mögliche Effekte mit einer höheren statistischen Präzision nachweisen zu können. Dazu müssen wir alle Hinweise auf neue Physik beleuchten. Einer der wichtigsten Schritte dazu ist die vollständige Nutzung der bisher aufgezeichneten Daten, was aktuell bereits im Gange ist. Daneben müssen wir zur Steigerung der statistischen Aussagekraft die Datenmengen weiterhin erhöhen. Ein Schritt dahin ist das trotz der Corona-Beschränkungen doch noch geglückte Upgrade des LHCb-Experiments. Parallel zum Upgrade wurde auch der LHC selbst stark überarbeitet.

Neben dem LHCb-Experiment wenden sich auch andere Experimente der B-Physik zu. Und so profitieren am LHC nun auch das CMS- und ATLAS-Experiment von den höheren Protonstrahlintensitäten. Beide Experimente verfolgen mittlerweile ebenfalls ein ausgiebiges Programm im Bereich der B-Physik, auch wenn das Detektordesign nicht optimal für den Nachweis von B-Mesonen geeignet ist. Eine damit mögliche unabhängige experimentelle Validierung ist neben der Analyse größerer Datenmengen essenziell für die Entdeckung neuer Phänomene. Doch wird auch schon die Datenmenge, die das LHCb-Experiment allein in der nächsten Betriebsperiode des LHC aufzeichnen wird, um einen Faktor fünf bis zehn größer sein als die gesamte bisher aufgezeichnete Datenmenge.

Jenseits der Experimente am CERN ist das kürzlich in Betrieb gegangene Belle-2-Experiment am japanischen Forschungszentrum KEK spezialisiert auf die Untersuchung von B-Mesonen. Im Vergleich zum LHC werden hier Elektron-Positron-Kollisionen erforscht. Diese komplementäre

ABB. 7 | MÖGLICHE NEUE PHYSIK



Die beiden Zerfallsdiagramme zeigen den Quarkübergang $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ nach Prozessen mit möglichen, unbekanntem Teilchen. Das linke Diagramm führt ein neues Z' -Boson ein, während das rechte Diagramm den Zerfall über ein Leptoquark (LQ) darstellt.

experimentelle Methode ist ebenfalls außerordentlich fruchtbar, um die Physik der B-Mesonen in Zukunft genauer zu untersuchen. Dies macht die nahe Zukunft der experimentellen Teilchenphysik mit B-Mesonen besonders interessant.

Zusammenfassung

Zurzeit ist die Flavour-Physik mit der Untersuchung von Zerfällen von B-Mesonen ein interessanter Bereich der experimentellen Teilchenphysik, da sie wichtige Tests des Standardmodells ermöglicht. Das kürzlich überarbeitete LHCb-Experiment wurde neu gestartet und soll eine bisher unerreichte Präzision in der Vermessung der Eigenschaften der B-Mesonen liefern.

Stichwörter

LHCb-Experiment, Flavour-Physik, Large Hadron Collider, CERN, neue Physik, B-Mesonen.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] S. L. Glashow, Nucl. Phys., **1961**, 22, 579.
- [2] A. Salam und J. C. Ward, Phys. Lett., **1964**, 13, 168.
- [3] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett., **1967**, 19, 1264.
- [4] G. Aad et al., ATLAS-Kollaboration, Phys. Lett. B., **2012**, 716, 1.
- [5] S. Chatrchyan et al., CMS-Coll., Phys. Lett. B., **2012**, 716, 30.
- [6] S. W. Herb et al., Phys. Rev. Lett., **1977**, 39, 252.
- [7] S. Behrends et al., Phys. Rev. Lett., **1983**, 50, 881.

- [8] N. Cabibbo, Phys. Rev. Lett., **1963**, 10, 531.
- [9] M. Kobayashi, T. Maskawa, Prog. Theor. Phys., **1973**, 49, 652.
- [10] G. Hiller und F. Krüger, Phys. Rev. D., **2004**, 69, 074020.
- [11] R. Aaij et al., LHCb-Koll., Phys. Rev. Lett., **2021**, 127, 151801.
- [12] R. Aaij et al., LHCb-Koll., Nature Phys., **2022**, 18, 277.
- [13] R. Aaij et al., LHCb-Koll., J. High Energy. Phys., **2017**, 08, 055.
- [14] R. Aaij et al., LHCb-Koll., arXiv-Preprint **2022**, 2212.09152 [hep-ex].
- [15] R. Aaij et al., LHCb-Koll., arXiv-Preprint **2022**, 2212.09153 [hep-ex].

Die Autoren



Alex Seuthe promovierte an der Technischen Universität Dortmund mit einer Dissertation in der experimentellen Teilchenphysik am LHCb-Experiment. Er ist Mitglied der LHCb-Kollaboration und arbeitet daneben an wissenschaftsphilosophischen Themen. In seiner Dissertation untersuchte er die Lepton-Flavour-Universalität mit seltenen Zerfällen von B-Mesonen in Zusammenhang mit den beobachteten Anomalien der Flavour-Physik.



Johannes Albrecht promovierte 2009 an der Ruprecht-Karls-Universität in Heidelberg in experimenteller Teilchenphysik am LHCb-Experiment. Neben verschiedenen leitenden Funktionen in der LHCb-Kollaboration hat er seit 2020 eine Heisenberg-Professur im Bereich der experimentellen Physik an der Technischen Universität Dortmund inne.

Anschriften

Dr. Alex Seuthe, Prof. Dr. Johannes Albrecht, Fakultät Physik, Otto-Hahn-Str. 4a, 44227 Dortmund.
alex.seuthe@tu-dortmund.de,
johannes.albrecht@tu-dortmund.de

ENTSCHEIDEST DU KÜNFTIG NOCH SELBST?

Herrschaft der künstlichen Intelligenz – Science oder Fiction?

www.technoseum.de



TECHNOSEUM