

# TEILCHENPHYSIK DEN MULTIQUARKS AUF DER SPUR

Die Protonen und Neutronen der Atomkerne bestehen aus jeweils drei elementaren Quarks. Theoretisch kann es jedoch auch Quark-Systeme aus vier, fünf und mehr Bausteinen geben. Neue Ergebnisse vom Large Hadron Collider am CERN befeuern diese Idee jetzt.

► [spektrum.de/artikel/1417457](http://spektrum.de/artikel/1417457)

MAXIMILIEN BRICE, CERN

MAXIMILIEN BRICE, CERN

Mit dem LHCb-Detektor am CERN suchen Physiker unter anderem nach Multiquark-Systemen. Dieses Foto wurde noch während der Bauphase gemacht. Gut erkennbar: die riesigen Magnete. Sie zwingen die beim Zerfall der Multiquarks entstehenden Teilchen auf charakteristische Spuren.



Georg Wolschin ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.

► Anfang der 1960er Jahre standen Physiker vor einem Problem: Seit den 1950er Jahren hatten sie in Kollisionsexperimenten zahlreiche neue Teilchen entdeckt, für die eine systematische Einordnung fehlte. Der zunächst sehr unübersichtliche »Teilchenzoo« ließ sich allerdings mit Hilfe mathematischer Methoden aus der Gruppentheorie ordnen. Dies legte die Vermutung nahe, dass die bis dahin bekannten Partikel meist nicht wie bisher geglaubt elementar waren, sondern sich aus einer kleinen Anzahl von Grundbausteinen zusammensetzten.

Im Jahr 1964 entwickelten dann zwei US-amerikanische Theoretiker unabhängig voneinander das Quark-Modell, wonach etwa **Proton** und **Neutron** (siehe »Multiquarks im Experiment«, S. 70/71) aus drei – zunächst hypothetischen – punktförmigen Teilchen aufgebaut wären. Der eine der beiden Forscher war Murray Gell-Mann vom California Institute of Technology; er erhielt 1969 den Nobelpreis für seine »Beiträge und Entdeckungen betreffend der Klassifizierung der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen«. Die deutlich ausführlicheren Arbeiten seines Kollegen George Zweig kursierten zwar als »CERN Reports«, waren aber nach Intervention des damaligen Theoriedirektors am CERN nicht regulär in einer wissenschaftlichen Zeitschrift erschienen.

Gell-Mann bezeichnete die neuen Elementarteilchen als **Quarks**, Zweig als **Aces**. Von ihnen gibt es verschiedene Sorten (Flavours): Zunächst ging man von einem up-, einem down- und einem strange-Quark (u, d, s) aus. Später kamen – vor allem zur Erklärung des Aufbaus anderer Teilchen – drei schwerere Varianten hinzu: charm (c), bottom (b) und top (t). Außer diesen »Valenzquarks«, aus denen sich die so genannten **Hadronen** genannten Teilchen zusammensetzen, existieren auch virtuelle Quark-Antiquark-Paare (Seequarks), die kurzzeitig aus dem Vakuum entstehen und gleich wieder vernichtet werden. Sie bestimmen zwar nicht die Struktur und die Quantenzahlen des Protons oder Neutrons, beeinflussen aber über die starke Wechselwirkung deren Masse.

Alle Quarks besitzen als so genannte Quantenzahlen einen halbzahligen **Spin** (Quanteneigendrehimpuls), drittel-

zahlige elektrische Ladungen sowie eine »Farbe«, die drei mögliche Werte annehmen kann. Die zugehörigen **Antiquarks** haben jeweils entgegengesetzte Vorzeichen der Ladungen. Warum die Massen aber innerhalb der sechs Quark-Sorten über rund fünf Größenordnungen variieren, ist bis heute nicht verstanden. So sind charm-Quarks mit 1,4 Protonenmassen vergleichsweise schwer. Sie spielen eine besondere Rolle bei den später im Artikel vorgestellten exotischen Gebilden aus mehr als drei Quarks, da sie offenbar für deren kurzzeitige Stabilisierung wichtig sind.

Heute ist folgende Modellvorstellung zum Allgemeingut jeder Physikausbildung geworden: **Baryonen**, die beispielsweise als Neutronen (ddu) und Protonen (uud) die Kerne aller Atome bilden, bestehen aus jeweils drei Quarks, die kurzlebigen **Mesonen** (etwa Pionen, Kaonen, J/ψ-Mesonen und viele andere) hingegen aus Paaren eines Quarks und eines Antiquarks. Zusammengehalten werden sie alle durch »Klebeilchen« namens **Gluonen**.

Letztere übermitteln die starke Wechselwirkung und sind wie die Photonen, welche die elektromagnetische Kraft übertragen, elektrisch neutral und masselos. Zusätzlich lassen sie sich aber durch die im Rahmen einer Quantentheorie möglichen Kombinationen der drei Farben und ihrer Antifarben charakterisieren. Die mittels dieser Gluonen aus zwei oder drei Valenzquarks aufgebauten stark wechselwirkenden Teilchen (Hadronen) sind stets farblos, sie bilden so genannte Farbsingulets.

#### Realität oder doch nur Gedankengebäude? Experimente liefern den Nachweis

Noch in den 1960er Jahren galt dieses Konzept keineswegs als selbstverständlich. Der einflussreiche Gell-Mann hatte zwar selbst dem Modell zum Durchbruch verholfen, glaubte anfangs aber nicht wirklich an die physikalische Existenz der Quarks. Vielmehr hielt er sie für ein Hilfskonstrukt zur Berechnung bestimmter Sachverhalte.

Dagegen war Zweig von Anfang an überzeugt davon, dass Quarks physikalisch real seien, und schlug vor, experimentell nach ihnen zu suchen. Jedoch ließen sie sich nicht als freie Teilchen mit gebrochenzahligen Ladungen nachweisen. Denn normalerweise sind sie durch die Gluonen stark aneinander gebunden und in den Hadronen eingeschlossen (Confinement). Nur bei extremen Verhältnissen von Temperatur oder Druck, wie sie bei relativistischen Schwerionenkollisionen entstehen oder im frühesten Universum bis etwa zehn Mikrosekunden nach dem Urknall herrschten, sollte sich für kurze Zeit ein See aus freien Quarks und Gluonen bilden – ein Quark-Gluon-Plasma.

Verschiedene Ideen aus der zweiten Hälfte der 1960er Jahre, die wesentlich auf den Theoretiker James D. Bjorken zurückgehen, ermöglichten schließlich die Entdeckung der Quarks: Physiker schossen hochenergetische Elektronen – die als punktförmige Teilchen keine Unterstruktur besitzen – auf Protonen, um deren innere Struktur zu untersuchen. Insbesondere erforschten sie in den 1970er Jahren am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) die Streuung von Elektronen mit mehr als sieben Gigaelektronvolt (Milliarden Elektronvolt) Energie an flüssigem Wasserstoff. Ähnlich wie die berühmten Streuexperimente von Ernest Rutherford mit

Alphastrahlen Anfang des 20. Jahrhunderts den Aufbau eines Atoms aus Kern und Hülle erkennen ließen, fand man so 1969 in 100 000-fach kleineren Dimensionen die »Partonen« als punktförmige, geladene Bausteine des Protons.

Sie stimmten in entscheidenden Eigenschaften mit den Quarks überein. Auch zeigte sich, dass die starke Wechselwirkung – im Gegensatz zur Quantenelektrodynamik, die die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt – umso schwächer wird, je tiefer man ins Proton eindringt. Heute versteht man dies als fundamentale Eigenschaft einer Feldtheorie für die starke Wechselwirkung, der **Quantenchromodynamik**.

Experimentelle Hinweise auf die Existenz der Gluonen tauchten erstmals 1979 am Positron-Elektron-Kollider PETRA (Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage) des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY auf. Dort produzierten Forscher in hochenergetischen Elektron-Positron-Kollisionen Quark-Antiquark-Paare, die jeweils in entgegengesetzte Richtungen auseinanderflogen und auf Grund der starken Wechselwirkung zwei Jets weiterer Teilchen erzeugten. Sie fanden jedoch auch Ereignisse mit je drei solchen Jets – offenbar musste also ein weiteres Teilchen an der Reaktion beteiligt gewesen sein. Genauere Analysen zeigten, dass es sich hierbei um die gesuchten Gluonen handelte.

Auf diese Weise hatten die Quarks unerwartet physikalisch reale Gestalt angenommen. Sowohl Zweig als auch Gell-Mann hatten allerdings bereits 1964 vorausgesagt, dass Baryonen auch aus fünf Quarks beziehungsweise Aces bestehen könnten – neben den drei üblichen Valenzquarks sollten sie noch ein zusätzliches Quark-Antiquark-Paar enthalten – und Mesonen aus zwei Quark-Antiquark-Paaren, also aus vier Quarks. Man nennt derartige Strukturen Pentaquarks und Tetraquarks. Auch aus heutiger Sicht sind solche Multiquark-Systeme völlig kompatibel mit dem Standardmodell der Teilchenphysik. Anders als die virtuellen Seequarks bestimmen die zusätzlichen Quarks aber hierbei die Struktur und Quantenzahlen.

Basierend auf spezifischen quantenchromodynamischen Modellen gibt es inzwischen zahlreiche neuere theoretische Arbeiten dazu, insbesondere zur Berechnung der mittleren Lebensdauern der Multiquark-Zustände. Diese sind sehr kurz, kleiner als  $10^{-21}$  Sekunden, und damit sind die Zustände im Experiment nicht direkt nachweisbar. Für Messungen stehen nur die langlebigeren Zerfallsprodukte zur Verfügung. Aus den Maxima in den resultierenden Massenspektren und den charakteristischen Verteilungen der Zerfallsprodukte je nach Streuwinkel lassen sich jedoch die relevanten Quantenzahlen wie Spin und **Parität** (das Verhalten bei Raumspiegelungen) der Multiquarks ableiten.

So hat sich die Suche nach Multiquark-Systemen im Lauf vieler Jahre zu einem Gebiet der experimentellen Teilchenphysik entwickelt, das zahlreiche Irrwege, mittlerweile aber auch Erfolge vorzuweisen hat. Den jüngsten erzielte die LHCb-Kollaboration am Large Hadron Collider LHC des europäischen Teilchenphysik-Forschungszentrums CERN in Genf in Proton-Proton-Kollisionen, bei denen zahlreiche, in der Regel bereits bekannte, Teilchen entstanden. Bei Energien von sieben und acht Teraelektronvolt haben die

## AUF EINEN BLICK DIE GESCHICHTE DER QUARKS

- 1 In den 1960er Jahren entdeckten Forscher, dass Proton und Neutron aus noch elementareren Bausteinen zusammengesetzt sind. Theoretiker begannen, ein Modell für diese Konstituenten – die Quarks – auszuarbeiten.
- 2 Nach und nach wurden immer mehr dieser Bausteine entdeckt: Das Standardmodell der Teilchenphysik zählt ihrer sechs. Zwischen ihnen wirkt die starke Wechselwirkung über die Gluonen.
- 3 Physiker haben bereits Gebilde aus vier und fünf Quarks nachgewiesen. Nach welchen Gesetzen diese sich bilden, wollen sie in künftigen Experimenten herausfinden.

Forscher dabei Anzeichen für Pentaquarks gefunden (siehe »Zerfall des Lambda-Baryons«, S. 72).

Das überraschte die Forscher, da sich in den etwa 50 Jahren seit der Vorhersage bisher nur wenige überzeugende Kandidaten herauskristallisiert hatten. So gab es ab 2002 Berichte über Messungen von Pentaquark-Zuständen, vor allem der so genannten  $\Theta^+$ -Resonanz. Unter einer Resonanz versteht man in der Teilchenphysik ein instabiles System, das oft aus mehreren Bausteinen besteht und nach kurzer Zeit weiter zerfällt.

#### Sein oder nicht sein?

##### Wenn Resonanzen verklingen

Die  $\Theta^+$ -Resonanz sollte etwa die 1,6-fache Protonenmasse besitzen und eine sehr kurze mittlere Lebensdauer von etwa  $10^{-23}$  Sekunden aufweisen. In ihr vermutete man jeweils zwei leichte up- und down-Quarks sowie ein Anti-strange-Quark. Zunächst berichteten japanische Wissenschaftler, später auch andere Forschergruppen weltweit über diese Pentaquarks. Allerdings ließen sie sich in Folgeexperimenten nicht reproduzieren, und die Publikationen mussten wieder zurückgezogen werden. Vermeintlichen Pentaquarks mit zwei strange-Quarks erging es ebenso.

Besser sieht es bei den Tetraquarks aus. Die Belle-Kollaboration im japanischen KEK-Forschungszentrum in Tsukuba fand 2003 in Elektron-Positron-Kollisionen eine scharfe Resonanz, die dem Charmonium ähnelte. Letzteres aus charm- und Anti-charm-Quark zusammengesetzte Meson war 1974 entdeckt und danach mit hoher Präzision vermessen worden. Die Resonanz zerfällt in Charmonium und zwei Pionen, enthält also ebenfalls charm- und Anti-charm-Quarks. Mit ihrer überraschend langen Lebensdauer passte sie jedoch nicht in das Schema der vermeintlich gut verstandenen charm-/Anti-charm-Zustände.

Die Belle-Resonanz ließ sich auch in anderen Experimenten in Stanford, am Fermilab oder am LHCb genau untersuchen, so dass es keinen Zweifel an ihrer Existenz gibt. Eine präzise Analyse durch die LHCb-Kollaboration am Genfer



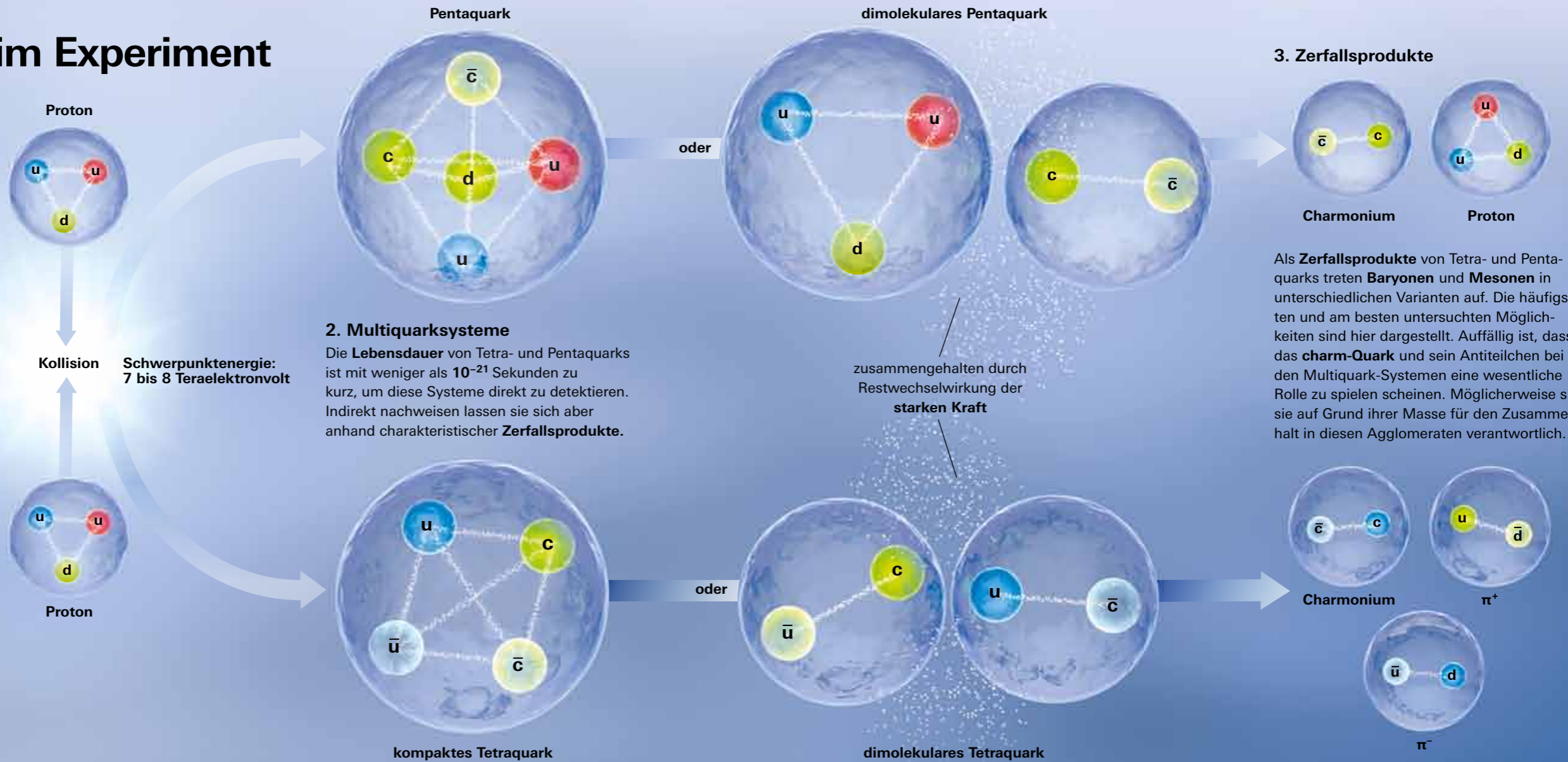
### Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Teilchenphysik finden Sie unter [spektrum.de/t/teilchenphysik](http://spektrum.de/t/teilchenphysik)

# Multiquarks im Experiment

## 1. Kollision

In Experimenten wie etwa dem **LHCb** am CERN bei Genf schießen Physiker hochenergetische Protonen aufeinander. Bei der Kollision werden neue Teilchen erzeugt. Über mehrere Zwischenschritte können dabei auch **Multiquark-Systeme** entstehen; indirekt beobachten ließen sich bisher **Tetra- und Pentaquarks** (Hadronen aus vier beziehungsweise fünf Quarks).



Als **Zerfallsprodukte** von Tetra- und Pentaquarks treten **Baryonen** und **Mesonen** in unterschiedlichen Varianten auf. Die häufigsten und am besten untersuchten Möglichkeiten sind hier dargestellt. Auffällig ist, dass das **charm-Quark** und sein Antiteilchen bei den Multiquark-Systemen eine wesentliche Rolle zu spielen scheinen. Möglicherweise sind sie auf Grund ihrer Masse für den Zusammenhalt in diesen Agglomeraten verantwortlich.

## Die wichtigsten Eigenschaften der Quarks

**Quarks** sind elementare Bausteine der Materie. Es gibt sechs von ihnen, zwei gehören jeweils einer Generation an. Sie zählen zu den **Fermionen**, das heißt, zwei Quarks mit identischen Quanteneigenschaften können niemals gemeinsam in einem System auftreten.

Die sechs Elementarteilchen unterscheiden sich deutlich in ihrer Masse und besitzen eine drittelzahlige elektrische Ladung. Hinzu kommen weitere Quanteneigenschaften wie **Spin** (quantenmechanischer Eigendrehimpuls) und **Parität** (die Eigenschaft gegenüber Raumspiegelung).

Generation		Quark / Antiquark	Ladung	Masse (MeV)
1	up	u	$+\frac{2}{3}$	2,3
	Anti-up	$\bar{u}$	$-\frac{2}{3}$	2,3
	down	d	$-\frac{1}{3}$	4,8
	Anti-down	$\bar{d}$	$+\frac{1}{3}$	4,8
2	strange	s	$-\frac{1}{3}$	95
	Anti-strange	$\bar{s}$	$+\frac{1}{3}$	95
	charm	c	$+\frac{2}{3}$	1275
	Anti-charm	$\bar{c}$	$-\frac{2}{3}$	1275
3	bottom	b	$-\frac{1}{3}$	4180
	Anti-bottom	$\bar{b}$	$+\frac{1}{3}$	4180
	top	t	$+\frac{2}{3}$	173210
	Anti-top	$\bar{t}$	$-\frac{2}{3}$	173210

Zudem tragen Quarks eine **Farbladung**, die auf die starke Wechselwirkung anspricht. Übermittler dieser Kraft sind die Klebteilchen oder **Gluonen**. Die Farbladung existiert in den drei Varianten »rot«, »blau« und »grün«. Alle drei Farben kommen mit derselben Wahrscheinlichkeit vor; addiert sind sie farbneutral. Ebenso neutralisieren sich **Farbe** und **Anti-Farbe**. Außerdem existiert zu jedem Quark ein **Antiquark** mit denselben Eigenschaften, aber umgekehrtem Vorzeichen.

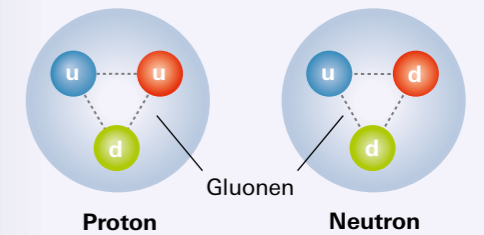


## Hadronen

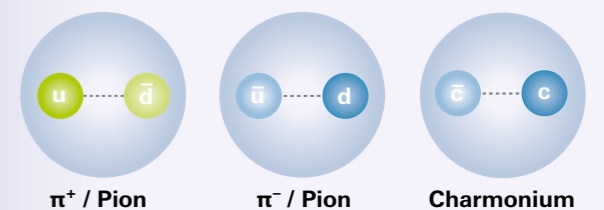
**Hadronen** setzen sich aus mehreren Quarks zusammen. Dazu zählen die **Baryonen**, die jeweils aus drei Quarks bestehen. Die bekanntesten – da langlebigsten – Beispiele darunter sind das **Proton** und das **Neutron**; sie bilden die Atomkerne. Die weitaus kurzlebigeren **Mesonen** ( $10^{-8}$  Sekunden oder kürzer) bestehen jeweils aus einem Quark und einem Antiquark.

Sowohl Baryonen als auch Mesonen können aus den unterschiedlichsten **Quark-Kombinationen** existieren. Sie müssen sich nur den **Spielregeln der Quantenchromodynamik** entsprechend zusammensetzen und nach außen hin farbneutral sein. Einzeln kommen Quarks in der Natur nicht vor, da die starke Kraft mit wachsendem Abstand zwischen ihnen zunimmt.

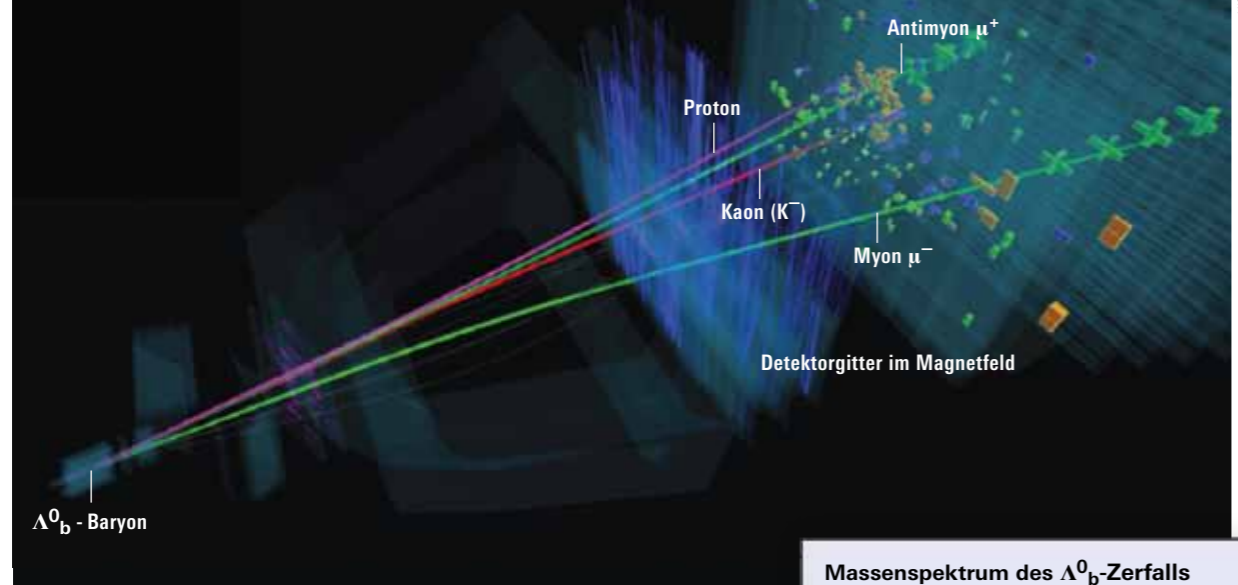
## Baryonen



## Mesonen



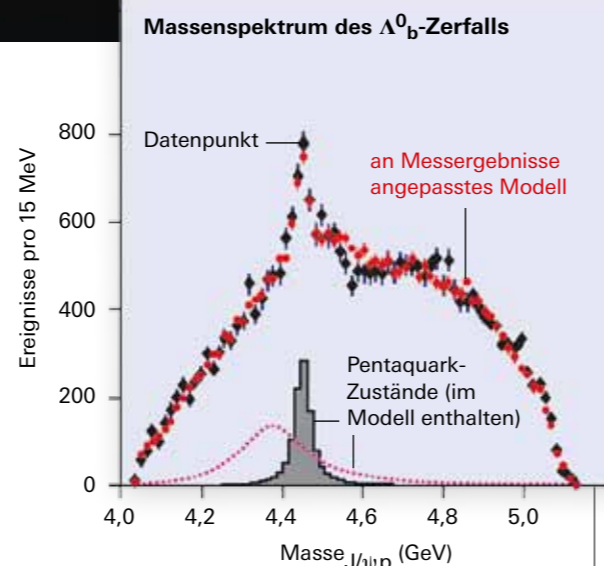
### Zerfallsspuren des Lambda-Baryons $\Lambda^0_b$ im LHCb-Detektor am CERN.



## Zerfall des Lambda-Baryons

Mit dem LHCb-Detektor beobachteten Forscher erstmals den Zerfall eines neutralen Lambda-Baryons  $\Lambda^0_b$  (bestehend aus einem u-, einem d- und einem b-Quark) in ein negativ geladenes Kaon ( $K^-$ ), ein Charmonium, das weiter in zwei entgegengesetzt geladene Myonen,  $\mu$ , zerfällt, und in ein Proton. Im Detektor werden die Teilchen je nach Masse, kinetischer Energie und elektrischer Ladung durch ein Magnetfeld abgelenkt (oben).

Im Massenspektrum (rechts) des  $\Lambda^0_b$ -Zerfalls in ein Charmonium ( $J/\psi$ ) tritt eine Resonanz bei 4,45 Gigaelektronvolt (GeV) auf. Sie ist mit Beiträgen von zwei Pentaquark-Zuständen mit einem Valenzquark-Gehalt  $uc\bar{c}ud$  und positiver Ladung kompatibel. Weitere Strukturen im Massenspektrum stammen von anderen Hadronen.



LHC bestimmte Spin und Parität eindeutig. Das nach seiner invarianten Masse  $X(3872)$  (in Megaelektronvolt/ $c^2$ ) benannte Teilchen ist mehr als viermal so schwer wie ein Proton. Seinem möglichen Valenzquark-Gehalt ( $c\bar{c}u\bar{u}$ ) nach könnte es sich um ein echtes Tetraquark handeln; die Struktur ist bisher jedoch nicht völlig aufgeklärt.

Insbesondere könnte es sich auch um einen Zustand aus einem  $D^0$ -Meson und einem angeregten Anti-D-Meson handeln, der denselben Valenzquark-Gehalt, aber eine andere Struktur als ein echtes Tetraquark besäße: Die beiden Mesonen würden durch eine Restwechselwirkung in ähnlicher Weise wie Atome im Molekül zusammengehalten; man spricht deshalb von einem dimolekularen Zustand. Ein gewöhnliches, aus Quark und Antiquark bestehendes

Meson ist ebenfalls noch nicht völlig ausgeschlossen, gilt jedoch auf Grund von Resultaten der LHCb-Kollaboration am CERN aus dem Jahr 2013 als weniger wahrscheinlich. Weiterführende Erkenntnisse versprechen sich die Experimentatoren erst vom derzeitigen Betrieb (Run II) des LHC bei einer Proton-Proton-Kollisionsenergie von 13 Teraelektronvolt, der seit 2015 läuft.

Es gibt aber zusätzliche Anzeichen für die reale Existenz von Tetraquarks. So konnte die Belle-Kollaboration 2007 mit dem so genannten  $Z^+(4430)$  einen geladenen Tetraquark-Kandidaten mit einem möglichen Valenzquark-Gehalt von  $c\bar{c}ud$  nachweisen, dessen Resonanzcharakter die LHCb-Kollaboration 2014 mit einer statistischen Signifikanz von 13,9 Standardabweichungen bestätigte: Es handelt sich hier

tatsächlich um ein neues exotisches Meson. Da es geladen ist, kann es kein gewöhnliches Meson aus Quark und Antiquark derselben Sorte sein. Zwei weitere Arbeiten zu möglichen Tetraquark-Kandidaten hat die LHCb-Kollaboration im Juni 2016 als Preprint veröffentlicht; sie warten noch auf die reguläre Publikation in einer Fachzeitschrift.

### Die Suche geht weiter:

#### Gibt es auch uncharmanten Multiquarks?

Weitere Kandidaten für exotische Mesonen wie das  $Z_c(3900)$ , das 2013 bei Belle und am chinesischen Beijing Electron Positron Collider gefunden wurde und in ein Charmonium und ein leichtes Meson zerfällt, lassen vermuten, dass nicht nur Tetraquarks, sondern auch andere Multiquark-Zustände – insbesondere Pentaquarks – nachweisbar sein könnten.

Während die Suche nach Pentaquarks aus den leichten up-, down- und strange-Quarks lange Zeit negativ verlief, konnten schließlich neue, 2015 publizierte Ergebnisse der LHCb-Kollaboration am Genfer Beschleuniger einen ersten großen Erfolg verbuchen. Die Forscher untersuchten in Proton-Proton-Kollisionen bei Energien von sieben und acht Teraelektronvolt Zerfälle von bestimmten dabei erzeugten Baryonen ( $\Lambda^0_b$ ). Das geschah vor allem mit dem Ziel, die mittlere Lebensdauer dieser schnell zerfallenden Teilchen genauer zu bestimmen, als das in der Vergangenheit möglich war. Die neutralen Baryonen sind mit etwa 5,6 Gigaelektronvolt/ $c^2$  fast sechsmal so massereich wie Neutronen. Wie Letztere bestehen sie aus drei Valenzquarks, von denen allerdings eines der beiden leichten down-Quarks im Neutron durch ein schweres bottom-Quark ersetzt ist.

In diesem Experiment bestimmten die Physiker nicht nur die mittlere Lebensdauer von 1,48 Pikosekunden ( $1,48 \cdot 10^{-12}$  Sekunden) mit hoher Genauigkeit, sondern entdeckten den erstmals gemessenen Zerfall dieser Baryonen in ein negativ geladenes Kaon (ein aus Anti-up- und strange-Quark zusammengesetztes Meson,  $\bar{u}s$ ), ein aus charm- und Anticharm-Quarks gebildetes Meson ( $J/\psi$ ) sowie ein Proton ( $uud$ ). Außerdem zeigte das Massenspektrum charakteristische Resonanzstrukturen bei Energien von 4,38 und 4,45 Gigaelektronvolt – das entspricht etwa der 4,7-fachen Protonenmasse. Diese Resonanzen zerfallen jeweils in ein  $J/\psi$ -Meson ( $c\bar{c}$ ) und ein Proton ( $uud$ ); demnach haben sie den Valenzquark-Gehalt  $uc\bar{c}ud$ .

Ungeklärt ist bisher, ob es sich bei den gemessenen Resonanzen um echte Pentaquarks handelt: also kompakte Gebilde aus fünf Quarks von sphärischer oder leicht deformierter Gestalt, die durch die starke, über Gluonen vermittelte Wechselwirkung aneinander gebunden sind. Es könnten nämlich auch Strukturen aus dem schweren  $J/\psi$ -Meson und einem Baryon sein, die eine Restwechselwirkung in ähnlicher Weise zusammenhält wie die Protonen und Neutronen in den Atomkernen oder die Atome in Molekülen. Man spricht deshalb bei dieser Variante wie bereits bei bestimmten Kombinationen aus zwei Mesonen auch von molekülartigen Strukturen.

Zu klären, wie sie genau aussehen, ist eine wichtige Aufgabe zukünftiger Forschung am LHC. Zwar sind die Experimentatoren heute noch weit entfernt von einer Messung des so genannten Quadrupolmoments der Pentaquark-

Zustände, mit dessen Hilfe sich die räumliche Deformation beschreiben ließe, haben dies aber als mögliches Ziel bereits im Auge.

Ohne eine zuverlässige Theorie für die Wechselwirkungen in Multiquark-Systemen können die Wissenschaftler derzeit in weiten Teilen nur spekulieren, warum es einen Charmonium-Pentaquark-Zustand gibt, während Pentaquarks aus leichteren Quarks – wie deren wechselvolle Entdeckungsgeschichte gelehrt hat – möglicherweise gar nicht existieren: Vielleicht sind vergleichsweise schwere charm-Quarks für die Bildung von Multiquark-Systemen notwendig, weil sie eine stärkere Bindung ermöglichen. Die Kopplung der Quarks wäre dann nicht wie bisher angenommen und in der Quantenchromodynamik beschrieben universell, also für alle Quark-Sorten gleich, sondern hänge eventuell von der Masse der Valenzquarks ab, was Konsequenzen für die mathematische Formulierung der Quantenchromodynamik haben könnte.

Dementsprechend sollte es in Zukunft auch denkbar sein, Pentaquarks mit den mehr als dreimal schwereren bottom-Quarks zu finden. Vielleicht wird das bereits im derzeitigen Run II des LHC in Genf gelingen, bei dem die Forscher bis zu dreimal mehr Daten vorzugsweise zu den mutmaßlichen Pentaquark-Resonanzen sammeln und bis 2017/18 auswerten wollen. Dabei werden sie auch nach Pentaquarks mit nur einem schweren charm- oder bottom-Quark suchen. Zusätzliche Einsichten in die Natur der Pentaquarks könnten ferner geplante Experimente am US-amerikanischen Jefferson National Laboratory zur Erzeugung der Resonanzen bei Kollisionen zwischen Photonen und Protonen liefern.

Um die Quantenchromodynamik besser zu verstehen, werden in Zukunft solide experimentelle Ergebnisse zu Tetraquarks und Pentaquarks benötigt. Insofern stellen die neuen Entdeckungen der LHCb-Kollaboration einen wichtigen Schritt auf dem Weg zum genaueren Verständnis der starken Wechselwirkung dar. ◀

### QUELLEN

**Aaij, R. et al. (LHCb Kollaboration):** Observation of  $J/\psi$ -p-Resonances Consistent with Pentaquark State. In: Physical Review Letters 115, 072001, 2015

**Gell-Mann, M.:** A Schematic Model of Baryons and Mesons. In: Physics Letters 8, 214, 1964

**Zweig, G.:** An SU3 Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking. CERN-TH.401. Preprint CERN Library, 1964

### LITERATURTIPPS

LHCb Reports Observation of Pentaquarks. In: CERN Courier, 26. August 2015 (online)  
Hier berichtet das CERN intern über die Pentaquark-Messungen.

**Meißner, U.-G.:** Charmante Pentaquarks? In: Physik Journal 10/2015, S. 21–22

Der Autor diskutiert, wie wichtig die Spezies der charm-Quarks für den Zusammenhalt der Pentaquarks ist.

**Ziegler, T.:** Pentaquarks – existieren sie wirklich? In: Physik in unserer Zeit 36, S. 157, 2005

Hier geht es um erste vermeintliche Messungen von Pentaquarks, die zunächst wieder revidiert werden mussten.