

Teilchen im Klassensatz

Wie lassen sich moderne Erkenntnisse über die Welt der kleinsten Teilchen in den Schulunterricht integrieren?

Manuela Kuhar und Thomas Trefzger

Bisher kommt die Teilchenphysik im Schulunterricht oft nur am Rande vor. Dabei ist das Thema faszinierend und gut geeignet, um aktuelle wissenschaftliche Arbeitsmethoden und die Bedeutung von Grundlagenforschung zu vermitteln. Das Netzwerk Teilchenwelt bietet didaktische Materialien an, um Jugendlichen wichtige Konzepte der Teilchenphysik näherzubringen.

Nur in wenigen Bundesländern ist die Teilchenphysik im Lehrplan der Sekundarstufe II vorgesehen. Unanschauliche Konzepte, fehlender Alltagsbezug und die ständig fortschreitenden Erkenntnisse machen es Lehrkräften nicht leicht, das Thema in den Unterricht zu integrieren. Doch ein grundlegender Einblick in die Teilchenphysik ist in der Schule gut möglich und wünschenswert für einen modernen Physikunterricht, der ein aktuelles Weltbild vermittelt.

Fragen der Teilchenphysik bergen eine große Faszination und werden immer wieder in den Medien aufgegriffen, zuletzt insbesondere durch den Nachweis des Higgs-Bosons. Schon grundlegende Kenntnisse der Teilchenphysik unterstützen Jugendliche dabei, Medienberichte einzuordnen und die Bedeutung von Grundlagenforschung als Kulturgut einzuschätzen. Außerdem eignet sich das Thema gut, um Jugendlichen einen Eindruck zu geben, wie das Wechselspiel von Theorie und experimenteller Überprüfung in der heutigen Wissenschaft funktioniert. Das Netzwerk Teilchenwelt, ein Zusammenschluss von 24 Teilchenphysik-Instituten und dem CERN, bietet didaktische Materialien zur Teilchenphysik an, von denen wir hier einige vorstellen [1].

In der Sekundarstufe I begegnet Schülern das klassische Teilchen-

modell. Es erklärt qualitativ, wie Aggregatzustände, Wärmeleitung, Luftdruck und andere Phänomene zustande kommen, ermöglicht aber keine konkreten Voraussagen. Klassische Teilchen werden in Kugelgestalt veranschaulicht und haben eine definierte Bahnkurve.

Wenn das Standardmodell der Teilchenphysik in der Schule behandelt wird, dann meist in der Sekundarstufe II im Anschluss an die Kernphysik, als deren logische Fortsetzung zu höheren Energien bzw. kleineren Längenskalen. Wie Atome und Atomkerne sind Elementarteilchen quantenmechanische Objekte, bei denen Alltagsvorstellungen von Form, Farbe, Temperatur etc. versagen. Man kann ihnen auch keine Bahnkurve zuordnen, sondern nur die Wahrscheinlichkeit angeben, dass sie sich zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort aufhalten. Sie verursachen unter bestimmten Bedingungen Wirkungen, die einem klassischen Massenpunkt entsprechen, können aber unter anderen Bedingungen wellenartige Phänomene bewirken. Wie man Jugendlichen adäquate Vorstellungen von der Quantenwelt vermitteln kann, diskutieren [2, 3].

Das Standardmodell erweitert den Teilchenbegriff. Während man sich unter klassischen Teilchen isolierte, stabile Materiebestandteile vorstellt, ist der moderne Teilchenbegriff weniger eindeutig festgelegt. So gelten Quarks als Elementarteilchen, obwohl sie nicht einzeln beobachtbar sind. Viele Elementarteilchensorten sind instabil, d. h.

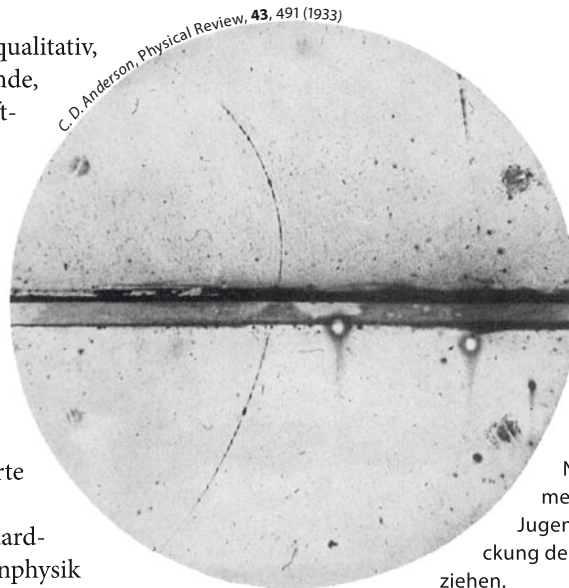


Abb. 1 Anhand dieser Nebelkammeraufnahme von 1932 können Jugendliche die Entdeckung des Positrons nachvollziehen.

sie wandeln sich nach kurzer Zeit in andere Sorten um. Auch Feldquanten von Wechselwirkungen wie Photonen werden heute als Teilchen bezeichnet.

Materie und Antimaterie

Streuexperimente zeigen, dass Elementarteilchen auf einen extrem kleinen Raumbereich konzentriert sein müssen. Da sich die entsprechenden Größenordnungen unserer Vorstellung entziehen, besteht eine erste Herausforderung darin, diese im Unterricht sorgfältig einzuführen, etwa durch Vergleiche: Wäre ein Atomkern so groß wie eine Erbse, würden sich die Elektronen im Mittel in einem Abstand von rund hundert Metern aufhalten. Dies ist ein Unterschied von vier Größenordnungen. Zwischen Quarks (typische Längenskala 10^{-18} m) und einem Atomkern liegen dann noch einmal vier Größenordnungen!

Es gibt zwölf Materieteilchensorten, die man in sechs Quarks und sechs Leptonen unterteilt. Nur Teilchen der „ersten Generation“ (Up- und Down-Quarks sowie Elektro-

Dipl.-Phys. Manuela Kuhar, Netzwerk Teilchenwelt (bis April 2013, jetzt: Westermann-Verlag, Braunschweig)
Prof. Dr. Thomas Trefzger, Universität Würzburg, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Campus Hubland Nord (Physik West), Emil-Hilb-Weg 22, 97074 Würzburg



Abb. 2 Mit den insgesamt dreißig Elementarteilchen-Steckbriefen, hier eine Auswahl, lassen sich Ordnungsprinzipien des Standardmodells weitgehend selbstständig erarbeiten. Materie-, Antimaterie- und Austauschteilchen haben eine graue, blaue bzw. grüne Hintergrundfarbe. Die Teilchensorten lassen sich anhand von Symbolen unterscheiden: Dreiecke stehen für Up- bzw. Down-artige Quarks (Spitze nach oben bzw. unten) und gelbe Symbole für Leptonen (Kreise: elektrisch geladene Leptonen, Rauten: Neutrinos). Andere Symbole stehen für Austauschteilchen.

+ Das Verhältnis zwischen der elektromagnetischen Anziehungskraft zwischen zwei Elektronen und der Gravitationskraft, die sie aufeinander ausüben, lässt sich einfach ausrechnen. Dieses ist etwa $F_C/F_G \approx 10^{42}$. Dieser Zahlenwert gilt nur für die Kräfte zwischen Elektronen bei relativ großen Abständen (mehr als einige Mikrometer); wie sich die Gravitation bei kleineren Abständen verhält, ist bisher nicht bekannt.

nen) machen die stabile Materie aus; Teilchen der zweiten und dritten Generation wandeln sich nach kurzer Zeit in leichtere Teilchen um, was als „Zerfall“ bezeichnet wird. Insofern ist der Begriff unglücklich gewählt, als er suggeriert, dass das ursprüngliche Teilchen in Bruchstücke zerfällt, wie bei der Kernspaltung. Es muss also geklärt werden, dass eine Umwandlung in völlig neue, vorher nicht vorhandene Teilchen gemeint ist.

Zu jeder Materieteilchensorte gibt es eine Antiteilchensorte mit gleicher Masse, aber entgegengesetzter Ladung. Das erste experimentell nachgewiesene Antiteilchen war das Positron. Carl Anderson entdeckte es 1932 zufällig mit einer Nebelkammer. Dieses historische Beispiel lässt sich gut in

den Unterricht integrieren. Anhand des Original-Nebelkammerbildes können Jugendliche nachvollziehen, wie Anderson darauf schließen konnte, das Antiteilchen des Elektrons nachgewiesen zu haben (Abb. 1) [4]: Aus der Richtung der Spurkrümmung können die Jugendlichen schließen, dass es sich um ein positiv geladenes Teilchen handeln muss. Es kann allerdings auch kein Proton sein; dessen Spur wäre dicker, da es deutlich massereicher ist und mehr Ionen in seiner Umgebung erzeugt. Stattdessen ist die Dicke der Spur mit der eines Elektrons vergleichbar. Also hatte Anderson ein positiv geladenes Teilchen entdeckt, dessen Masse etwa der eines Elektrons entsprach.

Teilchenzoo und Steckbriefe

In Schulbüchern und populärwissenschaftlichen Quellen sind Teilchen meist als bunte Kügelchen dargestellt. Dies kann die verbreitete Fehlvorstellung verstärken, dass sich makroskopische Eigenschaften wie Form, Farbe etc. auf die Mikrowelt übertragen lassen.

Verschiedene Ansätze erlauben durch bestimmte Darstellungen (Transparenz, Formveränderung in Animationen), die quantenmechanischen Eigenschaften von Teilchen zu verdeutlichen [5]. Einen etwas anderen Ansatz verfolgen die Plüschtiguren des „Particle Zoo“ [6] und die Elementarteilchen-Steckbriefe des Netzwerks Teilchenwelt (Abb. 2) [1]. Die Plüschtiguren bzw. geometrischen Darstellungen sind offensichtlich „absurd“ und lenken die Aufmerksamkeit darauf, dass es sich um ein Modell handeln muss.

Ein Satz Elementarteilchen-Steckbriefe umfasst 30 Karten, die jeweils die Eigenschaften eines Ele-

mentarteilchens zusammenfassen. Teilchensorten werden durch Hintergrundfarben bzw. Symbole unterschieden. So können Jugendliche Ordnungsprinzipien des Standardmodells weitgehend selbstständig erarbeiten, indem sie die Karten in sinnvolle Gruppen sortieren und dann Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Teilchen der einzelnen Gruppen oder von Materie und Antimaterie herausarbeiten. Weitere methodische Anregungen zur Verwendung der Steckbriefe sind unter [1] zu finden.

Spielregeln im Standardmodell

Die Elementarteilchensorten sind wie „Spielsteine“, die man experimentell vorfindet. Warum die Teilchen aber genau die beobachteten Eigenschaften haben, ist bislang nicht komplett verstanden. Grundlegender sind die „Spielregeln“ – also die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen. Im klassischen Teilchenmodell wirken bei geringen Abständen anziehende Kräfte zwischen den Teilchen, die nicht näher definiert sind. Das Standardmodell kennt dagegen drei Typen von Wechselwirkungen, wobei die Gravitation nicht berücksichtigt wird. Sie unterscheiden sich in ihren Eigenschaften, insbesondere Reichweite, Masse der Austauschteilchen und Stärke in Abhängigkeit vom Abstand, sowie ihren Auswirkungen.⁺⁾

Die elektromagnetische Wechselwirkung wird bereits in der Mittelstufe eingeführt. Doch um Phänomene auf kleineren Längenskalen zu erklären, sind zwei weitere Wechselwirkungen nötig: Die starke Wechselwirkung hält Quarks und Nukleonen zusammen, und die schwache Wechselwirkung ermög-



Abb. 3 Wenn zwei Menschen in Booten sich einen Ball zuwerfen, bewegen sie sich auseinander. Sie wechselwirken miteinander, in diesem Fall üben sie eine abstoßende Kraft aufeinander aus. Gleiches gilt für Elementarteilchen, indem sie ein Teilchen austauschen. Für andere Arten von Wechselwirkungen (anziehende Kraft, Teilchenumwandlungen etc.) gilt die Analogie nicht.

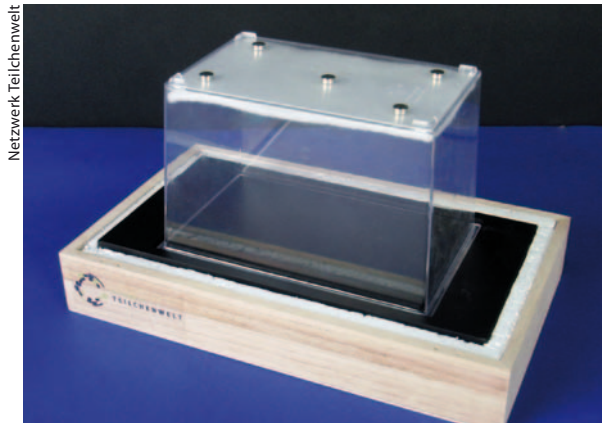


Abb. 4 So kann eine fertige Selbstbau-Nebelkammer aussehen. In der durchsichtigen Box ist oben ein alkoholgetränktes Stück Filz befestigt. Trockeneis kühlt den Aufbau von unten, sodass Spuren im Alkoholnebel erkennbar sind.

licht Teilchenumwandlungen (z. B. Betazerfall und Kernfusion).

Zu jeder Wechselwirkung gehört eine entsprechende Art von Ladung: Nur wenn ein Teilchen eine elektrische Ladung trägt, unterliegt es der elektromagnetischen Wechselwirkung. Ebenso gehört zur starken Wechselwirkung die starke Ladung (auch Farbladung genannt) und zur schwachen Wechselwirkung die schwache Ladung. Anstatt „Wechselwirkungen“ findet man häufig auch das Wort „Kräfte“, was allerdings den Inhalt des Begriffs nicht genügend wiedergibt: Wenn Teilchen wechselwirken, können sie nicht nur anziehende oder abstoßende Kräfte aufeinander ausüben, sondern es ist auch möglich, dass Teilchen neu entstehen, sich gegenseitig vernichten oder ineinander umwandeln. Bei alledem müssen Energie, Impuls, alle drei Ladungen und andere Größen insgesamt erhalten bleiben. Ein schultaugliches Beispiel für die Ladungserhaltung ist der Betazerfall (siehe Animation in [7]). Beim Beta-Minus-Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um (also ein Down-Quark in ein Up-Quark), wobei ein Elektron und ein Antineutrino $\bar{\nu}_e$ entstehen. Das Antineutrino ist notwendig, um die Erhaltung der schwachen Ladung zu gewährleisten:

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e,$$

elektr.	-1/3	= +2/3	-1	+0
starke	RGB	= RGB	+0	+0
schwache	-1/2	= +1/2	-1/2	-1/2
Ladung				

Das klassische Teilchenmodell führt nicht näher aus, wie die Kräfte zwischen den Teilchen zustande

kommen. Anstatt einer mysteriösen „Fernwirkung“ gibt das Standardmodell der Teilchenphysik eine detailliertere Erklärung: Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen werden von Austauschpartikeln (Photonen, Gluonen sowie W- und Z-Bosonen) vermittelt, quantisierte Portionen von Ladung und Energie, die bei einer Wechselwirkung erzeugt oder vernichtet werden können (Abb. 3).

Detektoren selbst bauen

Elementarteilchen entziehen sich jeder direkten Wahrnehmung oder Messung. Doch aufgrund ihrer Wechselwirkungen mit Detektoren können wir ihnen bestimmte Eigenschaften wie Masse, Ladungen etc. zuschreiben. Dabei unterscheidet man grundsätzlich zwei Typen von Teilchendetektoren. In den Anfängen der Teilchenphysik zu Anfang des 20. Jahrhunderts kamen bildgebende Detektoren wie Nebelkammern und Blasen-kammern zum Einsatz. Eine Nebelkammer kann man selbst bauen [1], sie eignet sich gut für Schülerexperimente (Abb. 4). Die Entstehung der Spuren können Jugendliche mit ein paar Vorkenntnissen zu Kondensation und Ionisation gut nachvollziehen (Abb. 5). Dabei lernen die Jugendlichen, Spurenarten zu zählen, sie verschiedenen Teilchensorten zuzuordnen und gegebenenfalls zu begründen, warum die Spuren verschieden aussehen. Die Materialien zum Bau von Nebelkammern sind einfach zu besorgen, oder es besteht die Möglichkeit, diese als fertiges Set von 15

Standorten des Netzwerks Teilchenwelt auszuleihen [8].

Heutzutage verwendet man vor allem elektronische Detektoren. Hindurchfliegende Teilchen wechselwirken mit dem Detektormaterial und erzeugen so Teilchenschauer oder Tscherenkow-Strahlung, die ihrerseits elektrische Signale erzeugen. Durch die Kombination benachbarter Ortsmessungen lässt sich die Spur des Teilchens bestimmen und damit der Impuls, die Ladung und weitere Messgrößen des Teilchens berechnen. Hierbei bietet es sich an, die Gesetze der klassischen bzw. relativistischen Mechanik anzuwenden, denn die Messfehler von Detektoren sind deutlich größer als die quantenmechanische Orts- bzw. Impulsunschärfe [9].

Im Unterricht lässt sich gut an Kenntnisse über die Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld anknüpfen. Das CERN hat Experimentieranleitungen und Arbeitsaufträge zusammengestellt, anhand deren man den Zusammenhang von Schulversuchen wie dem Fadenstrahlrohr zu modernen Teilchendetektoren und Beschleunigern herstellen kann [10].

Das Netzwerk Teilchenwelt bietet didaktische Materialien zum ATLAS-Detektor an [1]. Diese basieren auf dem Video „ATLAS Episode 2 – die Teilchen schlagen zurück“ [11]. Jugendliche lernen hiermit zunächst in Expertengrup-

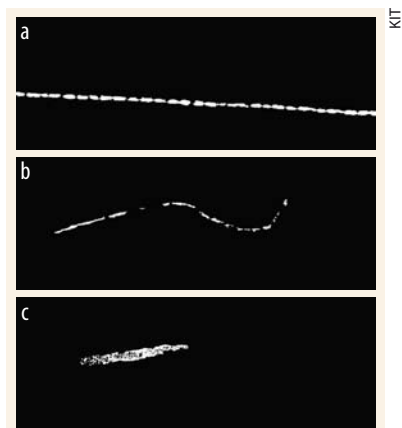
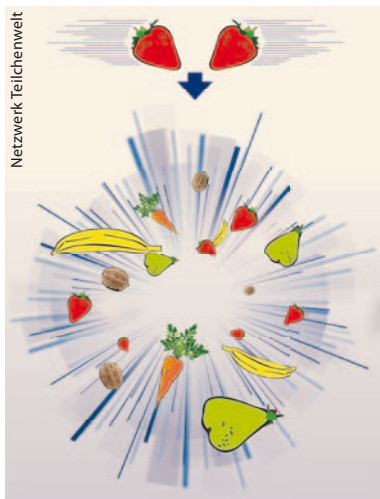


Abb. 5 Die Spuren in einer Nebelkammer zeigen ein schnelles Myon oder Elektron (a), ein langsames Elektron (b, beispielsweise aus einem Betazerfall) und ein Alphateilchen aus natürlicher Radioaktivität (c).

Abb. 6 Bei Protonen-Zusammenstößen im LHC entstehen völlig neue Teilchen, die vorher keine Bestandteile der Protonen waren – das ist so, als ob sich aus Erdbeeren bei einer Kollision ganz andere Früchte herausbilden.



pen die Detektorkomponenten kennen. Anschließend tragen sie ihre Ergebnisse zusammen und können erklären, wie sich Teilchensorten anhand der verschiedenen Signale im Detektor unterscheiden lassen.

Erzeugung und Zerfall

Massereiche Teilchen wie diejenigen der zweiten und dritten Generation entstehen bei Wechselwirkungen energiereicher Teilchen. Aus der vorhandenen Gesamtenergie können dabei völlig neue Teilchen entstehen. Dieser Vorgang hat im Alltag keine Analogie – ihn veranschaulichen zu wollen, wirkt absurd und damit einprägsam (Abb. 6). Da sich ein Teil der Bewe-

gungsenergie in Masse umwandelt, können die erzeugten Teilchen um ein Vielfaches schwerer sein als die ursprünglichen Teilchen.

Myonen, Positronen und leichte Hadronen (Pionen) wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts bei der Erforschung der kosmischen Strahlung entdeckt. Doch massereichere Teilchen entstehen nur äußerst selten. Um „exotische“ Teilchen gezielt zu erzeugen, lässt man seit den 1950er-Jahren in Beschleunigern Teilchen kollidieren. Die Energie eines Protons im Teilchenbeschleuniger LHC am CERN betrug beispielsweise zuletzt 4 Teraelektronenvolt (TeV). Da die Einheit Elektronenvolt unanschaulich ist, führt man sie mit Beispielen ein: 4 TeV entspricht etwa der Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Diese Energie ist jedoch auf einen Raum konzentriert, der etwa 10^{23} -mal kleiner als eine Mücke ist. Für einzelne Protonen ist eine solche Energie gewaltig viel; mit vergleichbar hohen Energien bewegten sich Teilchen wenige Sekundenbruchteile nach dem Urknall.

Welche Teilchen bei einer einzelnen Kollision entstehen, ist vom Zufall bestimmt. Die gesuchten massereichen Teilchen sind nicht direkt nachweisbar, da sie sich innerhalb ihrer kurzen Lebensdauer nicht weit genug bewegen, um vom Kollisionspunkt aus in einen Detektor zu gelangen. Doch man kann anhand ihrer Zerfallsprodukte auf ihre Existenz schließen: Denn eine Teilchensorte kann sich aufgrund der Energie- und Ladungserhaltung nur in bestimmte Kombinationen von Teilchen umwandeln. Wie oft welche Teilchenkombination herauskommen sollte, lässt sich theoretisch vorhersagen und experimentell überprüfen. Physiker suchen also nach entsprechenden Teilchenkombinationen, den Signalereignissen, die darauf hinweisen, dass ein gesuchtes Teilchen zerfallen sein könnte (Abb. 7).

Über den regulären Unterricht hinaus können Jugendliche in Teilchenphysik-„Masterclasses“ selbst ausprobieren, wie Forscher nach neuen Teilchensorten suchen. Das Netzwerk Teilchenwelt bietet diese

eintägigen Workshops an, die sich an Jugendliche ab der 10. Klasse richten und die an Schulen, Universitäten oder anderen Bildungseinrichtungen stattfinden [8].

Bei Masterclasses werten Jugendliche mit der Unterstützung von jungen Wissenschaftlern echte Daten von Forschungsinstituten wie dem CERN aus. So erfahren sie, welche Spuren Teilchen in Detektoren hinterlassen, wie man bestimmte Signalereignisse identifiziert und wie man die Ereignisse auswertet. Dabei wird deutlich, warum in der Teilchenphysik sehr viele Messungen notwendig sind (anders als es oft in Schulexperimenten der Fall ist): Wenn man Signalereignisse einzeln betrachtet, kann man nicht feststellen, ob sie wirklich vom Zerfall eines gesuchten Teilchens stammen oder von anderen Prozessen. Deshalb zählt man die Ereignisse und vergleicht ihre Häufigkeiten mit den Vorhersagen, die sich aus dem Standardmodell oder anderen Theorien ergeben. Auf diese Weise können schon Jugendliche den Nachweis neuer Teilchen wie dem Higgs-Boson nachvollziehen.

Zusammengefasst zeigen die geschilderten Ansätze, dass es sehr wohl möglich ist, die moderne Teilchenphysik sinnvoll und nachvollziehbar im Unterricht aufzugreifen.

Literatur

- [1] www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte
- [2] F. Karsten et al., Physik Journal, November 2011, S. 39
- [3] H. Fischler (Hrsg.), Quantenphysik in der Schule, Kiel (1992)
- [4] www.federmann.co.at/vfhess/Kapiteluebersicht.html
- [5] H. Fischler und Ch.S. Reiners (Hrsg.), Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht, Logos Verlag, Berlin (2006)
- [6] www.particlezoo.net
- [7] <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath.htm>
- [8] www.teilchenwelt.de/standorte/
- [9] Brigitte Falkenburg, Metamorphosen des Teilchenkonzepts, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule Heft 4/51, S. 14 (2002)
- [10] <http://project-physics-teaching.web.cern.ch/project-physics-teaching/german/experimente.htm>
- [11] <http://atlas.ch/multimedia/#episode-2>

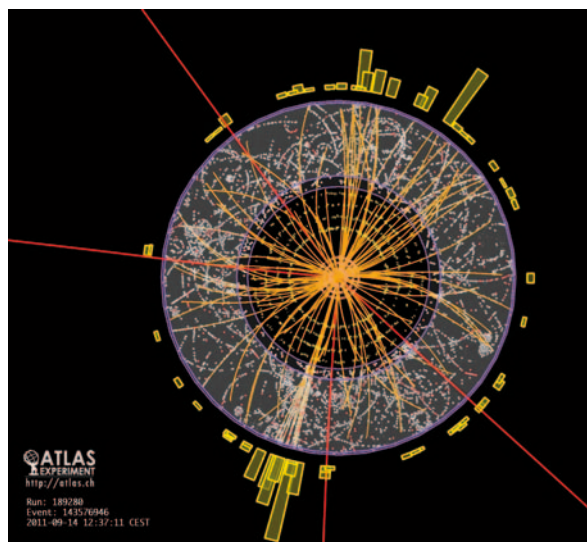


Abb. 7 In dem Querschnitt des ATLAS-Detektors sind Spuren von Teilchen zu sehen, die bei einer Protonen-Kollision entstanden sind. Farblich hervorgehoben sind die Zerfallsprodukte eines Higgs-Bosons: Zwei Myonen und zwei Antimyonen. Das Higgs-Boson zerfiel zunächst in zwei Z-Bosonen, die sich dann jeweils in ein Myon und ein Antimyon umwandelten.