

# Skript „Elementarteilchen“

Peter Goldkuhle, Detmold

## Inhalt

1. Vorbemerkungen .....	2
2. Fachdidaktische Einzelaspekte .....	4
3. The Large Hadron Rap.....	6
4. Das Skript .....	8

# 1. Vorbemerkungen

## *Entstehung des Skripts*

Die dem vorliegenden Skript zugrundeliegende Unterrichtsreihe wurde gehalten in einem Leistungskurs einer damaligen gemischten Gruppe aus Schülerinnen und Schülern der Jgst. 13 und der Q2 („Doppeljahrgang“) in den letzten 4 Wochen des Unterrichts vor den schriftlichen Abiturprüfungen 2013. Die Unterrichtsreihe schloss sich an die Reihe zur Kernphysik (mit den Unterrichtsinhalten „Elementare Eigenschaften der Strahlung radioaktiver Isotope“, „Der radioaktive Zerfall“, „Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie“, „Ionisierende Strahlung im Alltag“, „Kernenergie“) an.

Das wesentliche Ziel der Unterrichtsreihe „Elementarteilchen“ bestand darin, dass die Schülerinnen und Schüler einerseits Inhalt und Aufbau des Standardmodells der Elementarteilchen kennen und andererseits einen ersten, groben Überblick über die vier Wechselwirkungen erhalten.

## *Adressaten*

Das Skript wurde zunächst vom Fachlehrer erstellt und umfasste in seiner ursprünglichen Fassung für besonders interessierte Schülerinnen und Schüler bereits einige weitere, über den Unterricht hinausgehende Informationen. In der jetzigen Version des Skripts wurden noch einige wenige weitere Ergänzungen eingefügt, da es jetzt auch für diejenigen Kolleginnen und Kollegen, die sich bisher noch nicht mit dem Thema Elementarteilchen auseinandergesetzt haben, eine kleine Hilfe sein soll, um einen schnellen Überblick zu erhalten über die im Unterricht zu behandelnden fachlichen Inhalte.

Ein Unterrichtsgang ist aus dem Skript nicht unmittelbar abzuleiten und die dargestellten Sachverhalte gehen inhaltlich deutlich über das hinaus, was lt. KLP im Unterricht des Leistungskurses (und damit erst recht im Unterricht des Grundkurses) bearbeitet werden soll. Im einzelnen benennt der KLP für den **Leistungskurs** folgende Kompetenzbeschreibungen:

Im Bereich *Umgang mit Fachwissen*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- systematisieren mithilfe des heutigen Standardmodells den Aufbau der Kernbausteine und erklären mit ihm Phänomene der Kernphysik,
- erklären an Beispielen Teilchenumwandlungen im Standardmodell mit-hilfe der Heisenberg'schen Unschärferelation und der Energie-Masse-Äquivalenz.

Im Bereich *Erkenntnisgewinnung*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- vergleichen das Modell der Austauschteilchen im Bereich der Elementarteilchen mit dem Modell des Feldes (Vermittlung, Stärke und Reichweite der Wechselwirkungskräfte),
- aktualisieren ihr Wissen zum Stand der Erkenntnisse und zu offenen Fragen zur Forschung im Bereich der Elementarteilchen hinsichtlich der naturwissenschaftlichen Erklärung unserer Welt.

Im Bereich *Kommunikation*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- recherchieren zum aktuellen Wissenstand der Elementarteilchenphysik anhand der öffentlich zugänglichen Ergebnisse der großen Forschungseinrichtungen (u. a. CERN),

- tauschen sich mit anderen über den aktuellen Stand der Erkenntnis hinsichtlich der elementaren Bausteine der Materie aus.

Im Bereich *Bewertung*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- bewerten die Aussagen des heutigen Standardmodells im Hinblick auf seine Beständigkeit bzw. Vorläufigkeit.

Der KLP benennt für den **Grundkurs** folgende Kompetenzbeschreibungen:

Im Bereich *Umgang mit Fachwissen*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- erläutern mithilfe des aktuellen Standardmodells den Aufbau der Kernbausteine und erklären mit ihm Phänomene der Kernphysik,
- erklären an einfachen Beispielen Teilchenumwandlungen im Standardmodell.

Im Bereich *Erkenntnisgewinnung*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- vergleichen das Modell des Photons als Austauschteilchen für die elektromagnetische Wechselwirkung exemplarisch für fundamentale Wechselwirkungen mit dem Modell des Feldes.

Im Bereich *Kommunikation*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- recherchieren zum aktuellen Wissensstand der Elementarteilchenphysik anhand der öffentlich zugänglichen Ergebnisse der großen Forschungseinrichtungen (u. a. CERN),
- tauschen sich mit anderen unter angemessener Verwendung von Fachsprache über Erkenntnisse hinsichtlich der elementaren Bausteine der Materie aus.

Im Bereich *Bewertung*:

Die Schülerinnen und Schüler...

- bewerten den Stellenwert des aktuellen Standardmodells im Hinblick auf die Beständigkeit bzw. Vorläufigkeit physikalischer Modelle.

Wenn auch auf den ersten Blick die Anzahl der Kompetenzbeschreibungen auch für den Grundkurs recht hoch erscheint, so muss man sich sehr deutlich machen, in welcher Intensität die einzelnen inhaltlichen Aspekte tatsächlich für den Unterricht gefordert werden.

## 2. Fachdidaktische Einzelaspekte

Im Folgenden werden einzelne didaktische Aspekte benannt, die in der Vorbereitung des Unterrichts dazu beitragen können, die fachinhaltlichen Begründungen auch den Lernenden zu verdeutlichen, Schwerpunkte zu setzen und Transparenz über die Vorgehensweise zu ermöglichen.

1. Anknüpfungspunkt und zugleich inhaltliche Motivation der Reihe stellen die drei im Skript einleitend genannten Fragen dar, von denen die ersten beiden im Rahmen des vorherigen Unterrichtsreihe zwar angesprochen, aber dort nicht geklärt worden sind. Es ist somit ein für die Lernenden zwingender, logisch stringenter Übergang zur neuen Unterrichtsreihe gegeben.

Wie eine Rahmenhandlung und typisch für physikalische Forschung: Am Ende der Darstellung sind die Eingangsfragen zwar geklärt, aber anhand der dabei gewonnenen Erkenntnisse sind neue, weiterführende Fragen entstanden, deren Beantwortung heute noch in der Zukunft liegt...

Während des Einstiegs in die gesamte Unterrichtsreihe kann auch eine Auswertung des CERN-Rap (deutsch: <http://vimeo.com/1431471?pg=embed&sec=1431471> / englisch: <http://www.youtube.com/watch?v=7VshToyoGI8> ; <http://youtu.be/j50ZssEojtM> ) erfolgen: Gerade für Schülerinnen und Schüler heutiger Zeit sicher ansprechend gemacht, wird in diesem Video praktisch alles aufgezählt, wozu am CERN in Genf Forschung betrieben wird. Empfehlenswert kann es hier sein, die englische Version von Schülerinnen und Schülern in vorbereitender häuslicher Arbeit lesen (und übersetzen) zu lassen, danach kann im Unterricht das so Dargestellte in eine Reihenfolge für die Behandlung im Unterricht gebracht werden.

2. Nach der Frage des Aufbaus der beiden Nukleonen Proton und Neutron aus kleineren Objekten, den Quarks, bietet es sich geradezu an, den Beschuss der Nukleonen mit Elektronen genauer zu untersuchen. Mithilfe des hier anwendbaren Vorwissens der Schülerinnen und Schüler kann man einerseits die dafür nötige Wellenlänge der Elektronen ermitteln anhand der bekannten Größe der Nukleonen lassen ( $\lambda < 10^{-15}$  m) und andererseits damit gleichzeitig erkennen, dass hinreichend starke Beschleunigeranlagen notwendig sind ( $E_e > 1$  GeV), die die hinreichend kleine Wellenlänge der Elektronen ermöglichen.
3. Um den Lernenden die beiden wesentlichen Säulen der vermittelten Inhalte darzustellen, werden in zwei auch zeitlich im Unterricht voneinander getrennten Kapiteln die „Elementarteilchen“ von den „Wechselwirkungen“ unterschieden.
4. Im Bereich der Wechselwirkungen sollte besonders Wert gelegt werden auf das zugrunde liegende Modell der Austauschteilchen, das sich vom Modell des Feldes, wie die Lernenden es im voran gegangenen Unterricht immer kennengelernt hatten, fundamental unterscheidet: Hier kann man sehr schön verdeutlichen, dass die Physik bei der Beschreibung der Wirklichkeit immer auf Modelle angewiesen ist und zudem diese Modelle immer einen mehr oder weniger vorläufigen Charakter haben.
5. Besonders lohnenswert ist es für die Schülerinnen und Schüler zu erfahren, dass an mehreren Stellen die ihnen aus der Relativitätstheorie bekannte Gleichung  $E = m \cdot c^2$  für die Argumentation benötigt wird und dass auch die ansonsten im Schulunterricht eher anwendungsarm erscheinende Heisenberg'sche Unschärferelation auch in diesem Bereich wieder anzutreffen ist und Phänomene verständlich macht, die ansonsten unerklärlich blieben.

6. Da (derzeit) geeignete Schulexperimente kaum möglich sind, sollte man im Unterricht auf die vielen gut verwertbaren im Internet vorhandenen Materialien zurückgreifen: Hier bieten sich interaktive Simulationen, Videos etc. an, die durchaus motivierende Wirkung haben können (siehe Angaben zu den Materialien auf S. 9 des Skripts).
7. Die Feynman-Diagramme sind im Skript nur rudimentär aufgenommen. Obwohl sie bei den Elementarteilchenphysikern eine besondere Wertschätzung genießen und dort auch von großem Vorteil sind, sind sie für das Verständnis der in der Schule bearbeitbaren Vorgänge eher nebensächlich. Sie sind an dieser Stelle eigentlich nur der „Vollständigkeit“ aufgeführt, damit diejenigen Schülerinnen und Schüler, die sich später mit Physik beschäftigen werden, den Namen bereits einmal gehört haben.
8. Inwieweit man auf das Higgs-Teilchen eingehen möchte, muss sicher jede Lehrkraft für sich entscheiden. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Unterrichtsreihe war das Higgs-Teilchen und die Suche nach ihm zeitaktuell und durfte somit in keinem Fall ausgeklammert werden.
9. ...

### **3. The Large Hadron Rap**

Twenty-seven kilometers of tunnel under ground  
Designed with mind to send protons around  
A circle that crosses through Switzerland and France  
Sixty nations contribute to scientific advance  
Two beams of protons swing round, through the ring they ride  
'Til in the hearts of the detectors, they're made to collide  
And all that energy packed in such a tiny bit of room  
Becomes mass, particles created from the vacuum  
And then...

LHCb sees where the antimatter's gone  
ALICE looks at collisions of lead ions  
CMS and ATLAS are two of a kind  
They're looking for whatever new particles they can find.  
The LHC accelerates the protons and the lead  
And the things that it discovers will rock you in the head.

We see asteroids and planets, stars galore  
We know a black hole resides at each galaxy's core  
But even all that matter cannot explain  
What holds all these stars together – something else remains  
This dark matter interacts only through gravity  
And how do you catch a particle there's no way to see  
Take it back to the conservation of energy  
And the particles appear, clear as can be

You see particles flying, in jets they spray  
But you notice there ain't nothin', goin' the other way  
You say, "My law has just been violated – it don't make sense!  
There's gotta be another particle to make this balance."  
And it might be dark matter, and for first  
Time we catch a glimpse of what must fill most of the known 'Verse.  
Because...

LHCb sees where the antimatter's gone  
ALICE looks at collisions of lead ions  
CMS and ATLAS are two of a kind  
They're looking for whatever new particles they can find.

Antimatter is sort of like matter's evil twin  
Because except for charge and handedness of spin  
They're the same for a particle and its anti-self  
But you can't store an antiparticle on any shelf  
Cuz when it meets its normal twin, they both annihilate  
Matter turns to energy and then it dissipates

When matter is created from energy  
Which is exactly what they'll do in the LHC  
You get matter and antimatter in equal parts  
And they try to take that back to when the universe starts  
The Big Bang – back when the matter all exploded  
But the amount of antimatter was somehow eroded  
Because when we look around we see that matter abounds  
But antimatter's nowhere to be found.  
That's why...

LHCb sees where the antimatter's gone  
ALICE looks at collisions of lead ions  
CMS and ATLAS are two of a kind  
They're looking for whatever new particles they can find.  
The LHC accelerates the protons and the lead  
And the things that it discovers will rock you in the head.

The Higgs Boson – that's the one that everybody talks about.  
And it's the one sure thing that this machine will sort out  
If the Higgs exists, they ought to see it right away  
And if it doesn't, then the scientists will finally say  
"There is no Higgs! We need new physics to account for why  
Things have mass. Something in our Standard Model went awry."

But the Higgs – I still haven't said just what it does  
They suppose that particles have mass because  
There is this Higgs field that extends through all space  
And some particles slow down while other particles race  
Straight through like the photon – it has no mass  
But something heavy like the top quark, it's draggin' its \*\*\*  
And the Higgs is a boson that carries a force  
And makes particles take orders from the field that is its source.  
They'll detect it...

LHCb sees where the antimatter's gone  
ALICE looks at collisions of lead ions  
CMS and ATLAS are two of a kind  
They're looking for whatever new particles they can find.

Now some of you may think that gravity is strong  
Cuz when you fall off your bicycle it don't take long  
Until you hit the earth, and you say, "Dang, that hurt!"  
But if you think that *force* is powerful, you're wrong.  
You see, gravity – it's weaker than Weak  
And the reason why is something many scientists seek  
They think about dimensions – we just live in three  
But maybe there are some others that are too small to see  
It's into these dimensions that gravity extends  
Which makes it seem weaker, here on our end.  
And these dimensions are "rolled up" – curled so tight  
That they don't affect you in your day to day life  
But if you were as tiny as a graviton  
You could enter these dimensions and go wandering on  
And they'd find you...

When LHCb sees where the antimatter's gone  
ALICE looks at collisions of lead ions  
CMS and ATLAS are two of a kind  
They're looking for whatever new particles they can find.  
The LHC accelerates the protons and the lead  
And the things that it discovers will rock you in the head!

Katherine McAlpine

[http://en.wikipedia.org/wiki/Katherine\\_McAlpine](http://en.wikipedia.org/wiki/Katherine_McAlpine) (letzter Aufruf: 10.11.2014)

<http://youtu.be/j50ZssEojtM> (letzter Aufruf: 10.11.2014)

## ***4. Das Skript***

Das eigentliche Skript wird auf den folgenden Seiten dargestellt.



# Elementarteilchenphysik

---

## Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkungen	2
2. Fachdidaktische Einzelaspekte	4
3. The Large Hadron Rap	6
4. Das Skript	8
Elementarteilchen	1
Offene Fragen aus dem Unterricht zur Kernphysik	1
Das Quark-Modell für Hadronen	1
Die Leptonen	2
Das Standard-Modell	3
Masse und Energie der Teilchen im Standard-Modell	3
Die fundamentalen Wechselwirkungen	4
Austauschteilchen	4
Starke Wechselwirkung	4
Elektromagnetische Wechselwirkung	5
Schwache Wechselwirkung	5
Gravitation	5
Vergleich der Stärke der vier Wechselwirkungskräfte	5
Ergänzung des Standardmodells	6
Feynman-Diagramme	6
Die Masse der Teilchen	7
Elementarteilchen und Masse	7
Das Higgs-Feld	7
Ausblick	8
Forschung am CERN und DESY	8
Offene Fragen	8
Materialien	9
Internet	9
Physiker	10
Bildquellen	11

## Elementarteilchen

### Offene Fragen aus dem Unterricht zur Kernphysik

- Was hält die Protonen im Atomkern trotz der großen elektrostatischen Abstoßungskräfte zusammen?
- Wie kann es sein, dass das beim radioaktiven Beta-Zerfall entstehende Elektron (Positron) aus dem Atomkern kommt?
- Gibt es eine einfache Grundstruktur, die das Aufkommen des sog. „Teilchenzoos“ Mitte des 20. Jhdt. erklären kann? Bis in die 60er Jahre wurden im Zuge der Errichtung immer leistungsstärkerer Beschleuniger fast wöchentlich neue Elementarteilchen (um 1960 waren es über 200 Teilchen) entdeckt – so viele, dass ernsthaft kein Physiker mehr annehmen wollte, dies alles seien wirklich „elementare“ Teilchen.

### Das Quark-Modell für Hadronen

- Wenn man Elektronen hinreichend kleiner de Broglie-Wellenlänge auf Protonen schießt, kann man hoffen, durch die Art der Streuung der Elektronen Aufschluss über die Struktur eines Protons zu erhalten – wenn das Proton denn eine innere Struktur hat.

Vorüberlegung: Ein freies Proton hat einen Durchmesser in der Größenordnung  $10^{-15}$  m, zur Untersuchung benötigt man also Elektronen mit  $\lambda < 10^{-15}$  m, was einer Energie in der Größenordnung  $E_e > 1$  GeV entspricht.

- Streuexperimente beim Beschuss von Protonen mit solch hochenergetischen Elektronen führten dazu, dass deutlich wurde, dass es im Proton offensichtlich drei Ladungszentren gibt: zwei Ladungszentren

haben die Ladung  $+\frac{2}{3}e$  und eines hat die Ladung  $-\frac{1}{3}e$ . Bei Neutronen stellte man ebenfalls drei Ladungszentren fest: eines mit der Ladung  $+\frac{2}{3}e$  und zwei mit der Ladung  $-\frac{1}{3}e$ .

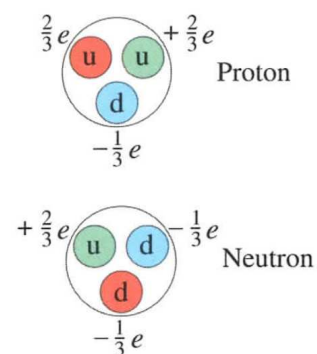


Abb. 1: Strukturen des Protons und des Neutrons

- Diesen Ladungszentren gab Gell-Mann die Namen **Up-Quark** (Ladung  $+\frac{2}{3}e$ ) und **Down-Quark** (Ladung  $-\frac{1}{3}e$ ).
- Weitere Kollisionsexperimente in immer energiereicheren Beschleunigern und immer besseren Teilchennachweismethoden führten dazu, dass man vier weitere Quarks identifizierte: **Strange-Quark** (Ladung  $-\frac{1}{3}e$ ), **Charme-Quark** (Ladung  $+\frac{2}{3}e$ ), **Bottom-Quark** (Ladung  $-\frac{1}{3}e$ ) und **Top-Quark** (Ladung  $+\frac{2}{3}e$ ). Die Massen (Ruheenergien) der Quarks nehmen in der genannten Reihenfolge stark zu.

- Zu allen sechs Quarks gibt es Anti-Quarks, die sich vom jeweiligen Quark im Vorzeichen der Ladung unterscheiden.
- Man kann kein einzelnes, freies Quark feststellen, sie treten immer in Kombinationen von zwei oder drei Quarks bzw. Anti-Quarks auf, die zusammen eine ganzzahlige positive oder negative Elementarladung  $z \cdot e$  mit  $z \in \{-2; -1; 0; 1; 2\}$ , ergeben, und bilden somit die Struktur vieler möglicher Teilchen, wie eben die des Protons, des Neutrons, des Antiprotons und vieler anderer Teilchen des früheren Teilchenzoos.
- Die unterschiedliche Anzahl der Quarks, aus denen ein Teilchen zusammengesetzt sein kann, führt zu der Einteilung der zusammengesetzten Teilchen in zwei Gruppen:
  - **Baryonen** (altgriech. „barys“ (schwer)): Diese „schweren“ Teilchen setzen sich aus 3 Quarks zusammen (z. B. Proton ( $uud$ ), Neutron ( $udd$ ), Antiproton ( $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ )).
  - **Mesonen** (altgriech. „meson“ (das mittlere)): Diese „mittelschweren“ Teilchen setzen sich aus 2 Quarks zusammen (z. B.  $\pi^+ = u\bar{d}$ ).
 Die Teilchen dieser beiden Gruppen werden als **Hadronen** (altgriech. „hadros“ (dick)) bezeichnet.

## Die Leptonen

- Es gibt neben den aus Quarks bestehenden Teilchen auch solche, die keine innere Struktur haben („punktförmig“). Wegen ihrer „Leichtigkeit“ nennt man diese Teilchen **Leptonen** (altgriech. „leptos“ (dünn, leicht)).
- Es gibt im Wesentlichen sechs Leptonen sowie die zugehörigen Antiteilchen:
  - **Elektron und e-Neutrino:** Beim Elektron handelt es sich um das altbekannte Elektron, das Elektron-Neutrino trat zum ersten Mal beim Beta-Zerfall auf.
  - **Myon und  $\mu$ -Neutrino:** Myonen werden in den oberen Schichten der Atmosphäre in großer Anzahl durch die Höhenstrahlung gebildet, gelangen bis auf die Erdoberfläche und können hier in der Größenordnung von  $10^2 \frac{\text{Teilchen}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$  registriert werden.
  - **Tau und  $\tau$ -Neutrino:** Das Tau wurde zuerst bei Elektron-Positron-Kollisionen entdeckt, es ist ein recht schweres Teilchen, gehört aber aufgrund seiner Eigenschaften in die Gruppe der Leptonen.

## Das Standard-Modell

- Das durch die Quarks und die Leptonen beschriebene Modell für den Aufbau der Materie bildet das (heutige) **Standardmodell**.

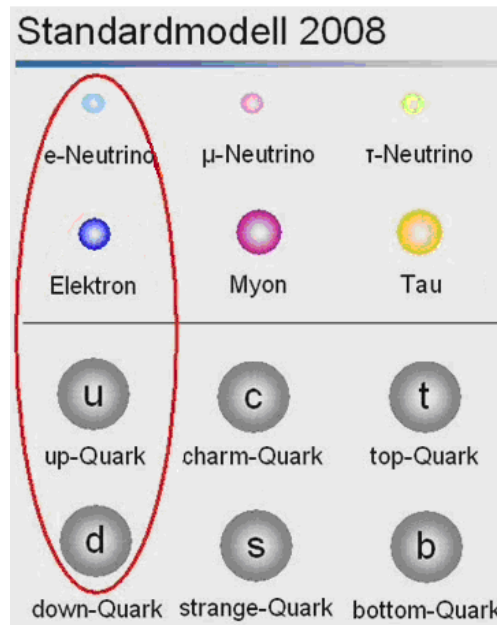


Abb. 2: Standardmodell (CERN Education)

- Die rot eingerahmten Teilchen sind die einzigen stabilen Teilchen (beachte aber: das d-Quark im Neutron zerfällt in ein u-Quark, vgl. weiter unten). Alle anderen zerfallen in recht kurzer Zeit, wenn sie, beispielsweise durch die Höhenstrahlung in der Erdatmosphäre oder auch in Beschleunigern, erzeugt worden sind.

## Masse und Energie der Teilchen im Standard-Modell

- Nach der SRT ist  $E = m \cdot c^2$ , sodass man die Masse auch durch die Energie ausdrücken kann gemäß  $m = \frac{E}{c^2}$ .

Die Masse  $m_p = 1,76 \cdot 10^{-27}$  kg des Protons ist damit  $m_p \approx 940 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ .

- Die Masse der oben im Standard-Modell notierten Teilchen nimmt von links nach rechts zu. So hat das (äußerst massereiche) Top-Quark die Masse  $m_{top} \approx 170 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ , d. h. zu seiner Erzeugung in einem Beschleuniger muss dieser mindestens die Energie 170 GeV zur Verfügung stellen (die Masse  $170 \frac{\text{GeV}}{c^2}$  liegt in der Größenordnung eines Goldatoms!).

Um Teilchen, wie es sie zwar kurz nach dem Urknall, aber heute aufgrund mangelnder Energiedichten im Weltall vielleicht gar nicht mehr gibt, wieder entstehen zu lassen, muss man gemäß  $E = m \cdot c^2$  genügend Energie zur Verfügung stellen, die sich dann unter geeigneten Voraussetzungen diese Materie wieder entstehen lässt.

## Die fundamentalen Wechselwirkungen

### Austauschteilchen

- Die Wechselwirkung zwischen Objekten wird modellhaft beschrieben durch den Austausch von Teilchen zwischen diesen Objekten (Vermittlerteilchen oder Austauschteilchen, s. auch Illustration von George Gamov in Abb. 3) Dies ist eine ganz andere Sichtweise auf die Beschreibung einer Wechselwirkung im Vergleich zum Feldbegriff, wie man ihn von der Gravitation, vom elektrischen oder magnetischen Feld her kennt. (Graphik als Hardcopy aus einem CERN-Lehrfilm)
- Bemerkung: Die beim Durchgang eines Quantenobjekts durch einen Doppelspalt auftretenden besonderen Phänomene erscheinen mithilfe der ständig mit seiner Umgebung ausgetauschten Austauschteilchen recht einleuchtend und verständlich – weil ein Doppelspalt eben etwas anderes ist als ein Einfachspalt oder ein anderes Hindernis, was durch die Austauschteilchen entsprechend „gemeldet“ wird.
- Die Heisenberg'sche Unschärferelation in der Form  $\Delta E \cdot \Delta t > h$  erlaubt es, dass ein Energiebetrag, d. h. eine Masse oder ein Teilchen,  $\Delta E$  kurzzeitig – ohne dass dies gegen den Energieerhaltungssatz verstieße – für ein kleines Zeitintervall  $\Delta t$  „entstehen“ kann: Die Energie kann um den Betrag  $\Delta E$  „überzogen“ werden. Nach der Zeit  $\Delta t$  gibt das Teilchen den Energiebetrag wieder zurück und ist damit wieder verschwunden. Mit  $\Delta E = m \cdot c^2$  ergibt sich  $\Delta t \approx \frac{h}{\Delta E} = \frac{h}{m \cdot c^2}$ . Wenn sich das Teilchen mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, ergibt sich für die Strecke
$$r = \Delta s = c \cdot \Delta t \approx c \cdot \frac{h}{m \cdot c^2} = \frac{h}{m \cdot c}.$$
Die Reichweite einer Wechselwirkung ist also mit der Masse des Austauschteilchens verknüpft ist: Je kleiner die Masse, desto größer die Reichweite  $r$ .
- Wenn das Austauschteilchen keine Ruhmasse hat, wird seine Reichweite unendlich groß (das masselose Gluon der starken Wechselwirkung hat jedoch wegen des "Confinement" (s. u.) eine nicht unendliche Reichweite). Bei von 0 verschiedener Masse, ist die Reichweite des Austauschteilchens endlich.



Abb. 3:  
„Austauschteilchen“

### Starke Wechselwirkung

- Mit der starken WW bezeichnet man die Bindung zwischen den Quarks in den Hadronen (vor der Einführung des Quark-Modells wurde als starke Wechselwirkung die Anziehungskraft zwischen den Nukleonen bezeichnet).
- Die Gluonen sind die Austauschteilchen zwischen Quarks und sind damit indirekt für die Anziehung von Protonen und Neutronen in einem Atomkern verantwortlich.
- Reichweite:
  - Bei sehr kleinen Abständen WW sehr gering (freie Bewegung der Quarks im Nukleon).
  - Bei größer werdenden Abständen WW sehr stark anwachsend (keine freien Quarks möglich, da beim Zuführen einer zur Trennung gedachten Energie so viel Energie benötigt wird, dass sich ein Quark-Antiquark-Paar bildet, sodass anschließend wieder mindestens ein Quarkpaar vorhanden ist („Confinement“)).
  - Bei noch größeren Abständen verschwindet die starke WW.

## Elektromagnetische Wechselwirkung

- Virtuelles Photon als Austauschteilchen zwischen Teilchen mit elektrischer Ladung.
- Die Reichweite des Austauschteilchens der elektromagnetischen WW ist unendlich, das Austauschteilchen hat keine Ruhemasse, seine Ausbreitungsgeschwindigkeit ist  $c$ .
- Die virtuellen Photonen sind an die beiden wechselwirkenden Ladungen gebunden: Sie werden nur von einer zur anderen Ladung ausgetauscht.

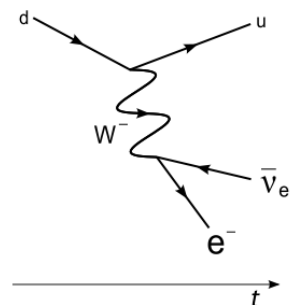
## Schwache Wechselwirkung

- $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z$  als Austauschteilchen zwischen allen elementaren Teilchen
- Reichweite: Aufgrund der großen Masse der  $W^-$  und  $Z$ -Austauschteilchen ist die Reichweite kleiner als der Atomkernradius.
- Ein Quark kann durch Aussenden eines  $W^+$  - oder  $W^-$  -Austauschteilchens in ein anderes Quark übergehen. Das  $W^+$  oder  $W^-$  geht seinerseits wieder über in ein Leptonenpaar oder in ein neues Quarkpaar.  
Da die Folgeteilchen eine Masse haben und die Gesamtenergie erhalten bleiben muss, kann nur ein massereicherer Quark in ein masseärmeres Quark übergehen.

- So wird folgender Übergang beobachtet: Das massereichere Down-Quark  $\left(4,8 \frac{\text{MeV}}{c^2}\right)$  geht in ein masseärmeres Up-Quark  $\left(2,4 \frac{\text{MeV}}{c^2}\right)$  unter Aussendung

eines  $W^-$  über. Daher zerfällt ein freies (also nicht das im Atomkern vorhandene) Neutron  $udd$  mit einer Halbwertszeit von ca. 12,5 Minuten in ein Proton  $uud$ , ein Elektron und ein Antineutrino (siehe Skizze rechts), während das freie Proton ein stabiles Teilchen ist (zumindest mit einer heute gesicherten Halbwertszeit von mehr als  $10^{30}$  Jahren!).

- Geschieht dieser Übergang mit einem der beiden Down-Quarks eines Neutrons, entsteht aus dem Neutron ein Proton unter Emission eines Elektrons und ein Anti-Neutrinos. Dies erklärt den **Beta-Minus-Zerfall** radioaktiver Isotope.



- Hinweis: Um die  $W^+$  -,  $W^-$  - und  $Z$  -Austauschteilchen geht es auf der interessant gestalteten CERN-Internetseite <http://kjende.web.cern.ch/kjende/de/index.htm>.

## Gravitation

- Graviton als vermutetes Austauschteilchen zwischen Teilchen mit einer Masse (wohl kaum experimentell nachweisbar).
- Die Reichweite des Austauschteilchens der Gravitation ist unendlich, das Austauschteilchen hat keine Ruhemasse, seine Ausbreitungsgeschwindigkeit ist  $c$ .

## Vergleich der Stärke der vier Wechselwirkungskräfte

- Die vier WW-Kräfte (starke WW : elektr.-magn. WW : schwache WW : Gravitation) stehen im He-Kern etwa im Verhältnis  $1 : 10^{-2} : 10^{-6} : 10^{-38}$  zueinander.

## Ergänzung des Standardmodells

- Die Austauschteilchen (Eichbosonen) ergänzen das (heutige) Standardmodell, wie es nachfolgend dargestellt ist (hier mit der Angabe einiger Eigenschaften):

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse: Ladung: Spin: Name:	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> Photon
				125,9 GeV 0 0 <b>H</b> Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> Gluon
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 <b><math>Z^0</math></b> Z Boson
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> Tau	80,4 GeV ±1 1 <b><math>W^\pm</math></b> W Boson
				Eichbosonen

Abb. 4: Teilchen des Standardmodells

## Feynman-Diagramme

- Zur Darstellung der WW-Prozesse verwendet man sog. Feynman-Diagramme: Die (gedachte) Rechtsachse gibt die zeitliche Abfolge in dem jeweiligen Prozess an. Der räumliche Ablauf der WW kann der (gedachten) Hochachse entnommen werden (beide Achsen werden auch häufig mit umgekehrter Belegung verwendet). In Feynman-Diagrammen gibt es stets eingehende und ausgehende Teilchen.
- Leptonen werden mit geraden Linien dargestellt. Die Wechselwirkungsteilchen der schwachen (W- und Z-Teilchen) und elektromagnetischen (Photon) Wechselwirkung werden mit Schlangenlinien symbolisiert. Antiteilchen werden immer mit einem entgegen der Zeitrichtung laufenden Pfeil gezeichnet.
- Zwei Beispiele:
  - Zerfall des Myon in ein  $W^-$ -Teilchen und ein Myonneutrino: Das  $W^-$ -Teilchen zerfällt danach weiter in ein Elektron und in ein Elektron-Antineutrino.
  - Paarvernichtung eines Myons, das mit einem Anti-Myon wechselwirkt: Dabei entsteht entweder ein Z-Teilchen oder ein Photon.

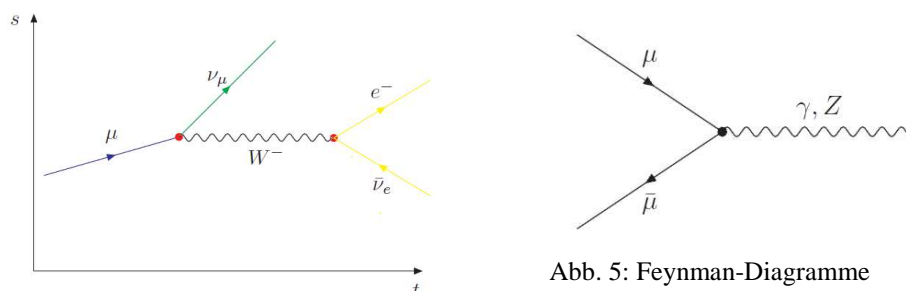


Abb. 5: Feynman-Diagramme

# Die Masse der Teilchen

## Elementarteilchen und Masse

- In der Theorie des (bisher beschriebenen) Standardmodells haben die Elementarteilchen zunächst keine Masse. Materie macht sich aber zweifelsfrei durch ihre Trägheit und ihre Eigenschaft, in der Umgebung einer anderen Materie Schwerkraftwirkung zu zeigen, also durch ihre Masse, bemerkbar. Wie kann man sich dann die Masse von Teilchen erklären?

## Das Higgs-Feld

- Die Idee: Man postuliert ein (den gesamten Raum des Weltalls – auch das Vakuum – durchsetzendes) Feld, das sog. Higgs-Feld, in dem sich die zunächst masselosen gedachten Elementarteilchen bewegen, wobei diejenigen Elementarteilchen, die sich, anders als Photonen, nicht mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, durch eine Wechselwirkung mit dem Feld „gebremst“ bewegen und dadurch eine Trägheit erhalten.
- Das von Peter Higgs bereits 1964 im Rahmen der relativistischen Quantenfeldtheorie theoretisch postulierte Vermittlerteilchen für diese WW ist das erst im Sommer 2012 am Beschleuniger LHC des CERN in Genf mit hoher Wahrscheinlichkeit nachgewiesene sog. Higgs-Teilchen. Higgs-Teilchen können mit den Elementarteilchen wechselwirken, die durch diese Wechselwirkung eine Masse erhalten. Vorstellbar ist diese Wechselwirkung als eine Art Reibung: So ist es zum Beispiel deutlich schwerer, einen Gegenstand in Honig zu beschleunigen als im Vakuum. Da massereichere Objekte auch schwerer zu beschleunigen sind, kann die Stärke der Reibung im Honig interpretiert werden als die Masse der Objekte.
- Einer der ersten Nachweise:

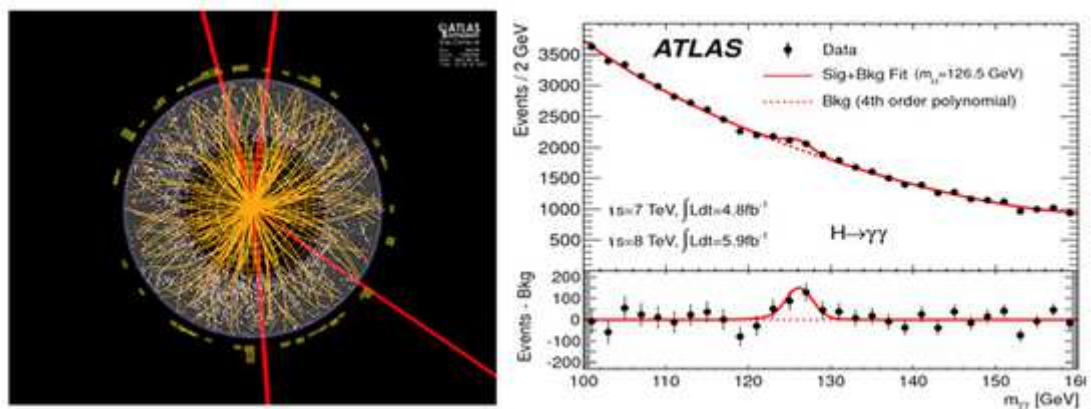


Abb. 6: ATLAS-Ereignis, bei dem ein Higgs-Boson-Kandidat in vier Myonen zerfällt (© CERN)



## Ausblick

### Forschung am CERN und DESY

- Zur Entspannung (jeweils letzter Zugriff am 14.11.2014):  
<http://www.youtube.com/watch?v=7VshToyoGI8> bzw.  
<http://vimeo.com/1431471?pg=embed&sec=1431471>

### Offene Fragen

- Welche Masse haben Neutrinos?
- Warum gibt es drei Generationen von Elementarteilchen?
- Wie erklärt man die sog. „dunkle Materie“ und „dunkle Energie“ im Weltall?
- Warum besteht das Weltall zu (weit) überwiegender Mehrheit aus Materie und nicht aus Antimaterie?
- Warum ist die Schwerkraft (im Vergleich zu den drei anderen Kräften) so schwach – gibt es mehr als drei (räumliche) Dimensionen?
- ...

## Materialien

Internet (für alle angegebenen Links: jeweils letzter Zugriff am 14.11.2014)

- CERN-Film zum Standardmodell und Weiteres (sehr übersichtlich):
  - <http://project-physicsteaching.web.cern.ch/project-physicsteaching/german/kurzvideos/film6.wmv>
- Ausgezeichnete Unterrichtsmaterialien des CERN zur Teilchenphysik:
  - <http://project-physicsteaching.web.cern.ch/project-physicsteaching/german/>
- Film zum Standardmodell (elementar):
  - <http://www.youtube.com/watch?v=WfiDw-mpdso>
- Film zum Aufbau der Materie und zu den WW-Kräften
  - <http://m.youtube.com/watch?v=HVxBdMxgVX0> (Teil 1)
  - <http://m.youtube.com/watch?v=WGWIT8SqXLM> (Teil 2)
- Einführung in Teilchenphysik (DESY):
  - <http://teilchenphysik.desy.de/>
  - <http://kworkquark.desy.de/1/index.html>
- Übungen und Erklärungen zu Ereignisidentifikation (umfangreiche CERN-Internetseite zum Analysieren von (Original-) Eventdisplays) am Computer:
  - <http://kjende.web.cern.ch/kjende/de/wpath.htm>
- Eine hervorragende, gut verständliche Seite zum Aufbau der Materie und ihrem Zusammenhalt:
  - <http://particleadventure.org/german/frameless/startstandard.html>  
bzw.
  - <http://particleadventure.org/german/frameless/index.html>
- Übungen zur Teilchenphysik in der Realität:
  - <http://physicsmasterclasses.org/neu/>
  - <http://www.teilchenwelt.de/>
- Naturphänomene und Anregungen für den Physikunterricht:
  - <http://www.solstice.de>
- ... und vieles mehr:
  - <http://www.teilchenwelt.de/material/linksammlung-zur-teilchenphysik-nach-themen-sortiert/>

## Physiker

- de Broglie, Louis (1892-1987), Nobelpreis 1929
- Feynman, Richard (1918-1988), Nobelpreis 1965
- Gell-Mann, Murray (1929), Nobelpreis 1969
- Higgs, Peter (1929), Nobelpreis 2013

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Strukturen des Protons und des Neutrons.....	1
Abb. 2: Standardmodell (CERN Education) .....	3
Abb. 3: „Austauschteilchen“ .....	4
Abb. 4: Teilchen des Standardmodells .....	6
Abb. 5: Feynman-Diagramme .....	6
Abb. 6: ATLAS-Ereignis, bei dem ein Higgs-Boson-Kandidat in vier Myonen zerfällt (© CERN).....	7

## Bildquellen

Abb. 2: CERN Education, Teilchenphysik multimedial

Film 6: Standardmodell

<http://project-physicsteaching.web.cern.ch/project-physicsteaching/german/kurzvideos/film6.wmv>

und

Präsentation 6, Folie 33:

<http://project-physicsteaching.web.cern.ch/project-physicsteaching/german/kurzvideos/film6/praesentation6.ppt>

(jeweils letzter Zugriff am 10.11.2014)

Abb. 3: Illustration: George Gamov (CERN Education, Teilchenphysik multimedial, Präsentation 6, Folie 14)

Abb. 4: Standardmodell: <http://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell> Author:

Standard\_Model\_of\_Elementary\_Particles.svg: MissMJ

(letzter Zugriff am 10.11.2014)

Abb. 5: Feynman-Diagramme aus CERN: International Masterclasses:

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/feynman.htm>,

speziell:

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/imagesduplikat/Feynman/MyonKoordinaten.png>

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/imagesduplikat/Feynman/Paarvernichtung.png>

(jeweils letzter Zugriff am 10.11.2014)

Abb. 6: Max-Planck-Gesellschaft, Forschungsbericht 2013:

[http://www.mpg.de/6965355/MPP\\_JB\\_2013?c=7291695](http://www.mpg.de/6965355/MPP_JB_2013?c=7291695)

<http://www.mpg.de/7059190/zoom.jpg>

(jeweils letzter Zugriff am 10.11.2014)