

# Weißeritzgymnasium Freital

## Facharbeit

### **Berechnungen zur Wahrscheinlichkeit der Detektion schwererer Quarks am Large Hadron Collider**

Betreuende Lehrerin: Frau Tiebel

Externer Betreuer: Maximilian Kotz

Marie-Sophie Thäringen, 10/5

Schuljahr 2021/2022

Freital, 01.04.22

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Standardmodell	4
2.1 Überblick	4
2.2 Quarks	4
2.2.1 Eigenschaften	4
2.2.2 die vier Wechselwirkungen	5
3 Feynman-Diagramme	8
4 Das Top-Quark	12
4.1 Eigenschaften	12
4.2 Entstehung	13
4.3 Zerfall	15
5 Berechnungen zur Detektion schwererer Quarks am LHC	16
6 Fazit	25
Literaturverzeichnis	27
Anhang	29
Selbstständigkeitserklärung	30

# 1 Einleitung

Alles Makroskopische lässt sich bis in seine kleinsten mikroskopischen Teile zerlegen. In einem Ameisenhaufen beispielsweise kann man mit bloßem Auge einzelne Ameisen erkennen. Mit Hilfe einer Lupe ist es möglich feinere Strukturen zu erfassen. Ein Lichtmikroskop wiederum gewehrt einem den Einblick auf einzelne Zellen einer individuellen Ameise. Im weiteren Vergrößerungsschritt werden einzelne Atomstrukturen sichtbar. Dafür wird allerdings schon ein Elektronenmikroskop benötigt. Die Chemie lehrte uns, dass Atome wiederum aus dem Atomkern und der Atomhülle bestehen. Im Atomkern findet man Neutronen und Protonen, in der Atomhülle dagegen Elektronen. Lange Zeit dachte man, dies seien die finalen und somit kleinsten Bausteine unseres Universums. Die Ergebnisse jahrelanger Forschung, mithilfe von Teilchenbeschleunigern, sollten aber zeigen, dass dieses vereinfachte Modell von Atomen doch nicht perfekt unsere Welt beschreibt. Nach und nach fand man heraus, dass Protonen und Neutronen selbst aus sogenannten Quarks aufgebaut sind, von denen mit der Zeit immer mehr postuliert und schließlich bewiesen wurde. Es liegt nahe, dass man davon ausging, dass auch das Elektron selbst aus Quarks bestünde, jedoch erwies sich diese Annahme als falsch. Schließlich wurde das Elektron zusammen mit den Quarks und allen anderen bisher bewiesenen Grundbausteinen im sogenannten Standardmodell der Elementarteilchenphysik aufgelistet. Mit den Jahren wurde dieses stets erweitert, jedoch fundierten sich drei Generationen, in die fast alle Teilchen untergeordnet wurden. Das wichtigste, charakteristische Merkmal dieser Einteilung, ist die steigende Masse mit steigender Generation, auf dessen Schema sich meine Forschungen stützen. Seit reichlichen zwei Jahren beschäftige ich mich nun mit der Teilchenphysik im konkreten. Im Zuge dessen, habe ich mir des Öfteren die Frage gestellt, weshalb man sich so sicher ist, dass nach der dritten Generation nicht noch schwerere Quarks vorhanden sind, die eine vierte Generation bilden würden. In Grundlagenforschung wie dieser spricht man allerdings nur noch von gewissen Wahrscheinlichkeiten, deshalb beschäftige ich mich in folgender Facharbeit mit der Forschungsfrage:

Welche kritische maximale Masse eines Quarks lässt sich mit den derzeitigen Mitteln detektieren? Ist es wahrscheinlich, dass in diesem Massenspektrum eine vierte Generation von Quarks gefunden werden kann?

In dieser Arbeit möchte ich berechnen, welche Energie durch die Beschleunigung eines Protons erreicht werden kann, um somit herauszufinden welche maximale Masse ein Teilchen

besitzen könnte, welches aus dem Zerfall des Protons entsteht. Dazu entwerfe ich eine potenzielle vierte Quark-Generation, bestehend aus zwei neuen Quarks, und spekuliere über die Wahrscheinlichkeit ihrer Entstehung abhängig von ihrer Massenverteilung. Hierbei stütze ich mich auf die Zerfallsregeln der Quantenphysik.

Unterstützt wurde diese Arbeit von Steffi Tiebel und Maximilian Kotz.

Mein zusätzlicher eigener Anstoß zu dieser Arbeit war das Streben nach dem Verständnis der Zerfalls muster und -regeln, sowie der Wunsch nach der Faszination einer breiteren Menge an diesem hochinteressanten und grundlegenden Thema.

## 2 Standardmodell

### 2.1 Überblick

Alle Teilchen, die im Laufe der Jahre gefunden beziehungsweise nachgewiesen wurden, werden im sogenannten Standardmodell der Elementarteilchenphysik geordnet aufgeführt (siehe Anhang (1)). In ihm sind allerdings nur die „kleinsten“ Grundbausteine tabellarisch dargestellt. Zusammensetzungen finden hier keinen Platz. Das Standardmodell ist in drei Kategorien der verschiedenen Teilchenarten unterteilt: die Leptonen, die Quarks und die Eichbosonen, auch Bosonen genannt. Leptonen und Quarks gehören zur Gruppe der Fermionen, den Materienteilchen. Eichbosonen sind kein Teil dieser Gruppe, sie sind Wechselwirkungsteilchen. Insgesamt fasst das Standardmodell Teilchen, darunter Materie sowie Antimaterie. Im speziellen existieren 36 Quarks, 12 Leptonen, 12 Eichbosonen und ein Higgs-Boson. Soweit zumindest die Nachweise, verschiedene Postulate zu weiteren Teilchen werden gegenwärtig überprüft.

Da sich diese Arbeit mit der Gruppe der Quarks beschäftigt, wird im Folgenden nur detaillierter auf diese Teilchenart eingegangen.

### 2.2 Quarks

#### 2.2.1 Eigenschaften

Quarks sind die grundlegenden Bausteine der meistbekannten Teilchen, der Protonen. Diese sind vor allem maßgebend für die Forschung nach weiteren Teilchen und werden überwiegend für Teilchenkollisionen verwendet. Bei der Kollision wechselwirken vorrangig

die Quarks miteinander, lassen neue Teilchen entstehen und sind somit wichtige Bestandteile bzw. „Arbeitsmittel“ der Grundlagenforschung.

Wie auch die Leptonen, teilt man die Quarks in 3 Generationen, sowie die up-artigen und die down-artigen Quarks <sup>1</sup>. Das bedeutet, dass jede Generation aus zwei Quarks besteht; einem up- und einem down-artigen. So existiert das Up- und das down-Quark, die erste Generation; das Charm- und das Strange-Quark, die zweite Generation sowie das top- und Bottom-Quark, welche die dritte und zuletzt bewiesene Generation bilden. Mit zunehmender Generation nimmt auch die Masse zu, wobei das Up-Quark das leichteste und das Top-Quark das schwerste Teilchen darstellt <sup>2</sup>.

Eine weitere Eigenschaft der Quarks, sowie aller weiteren Elementarteilchen, ist der Spin. Dieser ist als eine Art Eigendrehimpuls des Teilchens zu verstehen, was man sich allerdings nicht genau so bildlich darstellen sollte, da alle Elementarteilchen 0-dimensional sind. Sie haben somit keine räumliche Ausdehnung und können sich somit auch nicht drehen. Dennoch existiert diese unveränderliche innere Teilcheneigenschaft, welche stets ein halb- oder ganzzahliges Vielfaches des reduzierten planckschen Wirkungsquantums, einer Naturkonstante, darstellt<sup>3</sup>. Alle Materienteilchen, zu denen auch Quarks gehören, besitzen einen Spin von  $\frac{1}{2}$ . Wechselwirkungsteilchen, welche im Folgetext zur Sprache kommen werden, besitzen hingegen einen Spin von 1.

## 2.2.2 Die vier Wechselwirkungen

In der Teilchenphysik konnte man vier Wechselwirkungsarten finden, mit Hilfe derer man zusammen mit anderen elementaren Eigenschaften, die gefundenen Teilchen tabellarisch im Standardmodell ordnete. Teilchen, die gleich wechselwirken konnten, wurden somit, unter anderem, zu den bekannten Teilchenarten zusammengefasst. Im Laufe der Zeit wurden die Wechselwirkungen spezieller charakterisiert und man fand heraus, warum welches Teilchen wie wechselwirken kann. So gehört zu jeder Wechselwirkung eine Ladungsart, die ein

---

<sup>1</sup> Vgl.

[https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/Material\\_Lehrkraefte/Standardmodell\\_Infos\\_01.pdf](https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Standardmodell_Infos_01.pdf) (zuletzt abgerufen am 17.07.21, 12.00 Uhr).

<sup>2</sup> Vgl.

<https://slideplayer.org/slide/4956204/16/images/5/Quarks+und+Leptonen+Massen+in+MeV+Die+Masse+des+top-Quarks.jpg> (zuletzt abgerufen am 17.07.21, 12.00 Uhr)

<sup>3</sup>

Vgl. [https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spin#:~:text=Spin%20\(von%20englisch%20spin%20E2%80%9ADrehung,Spinquantenzahl\)%20des%20eduzierten%20planckschen%20Wirkungsquantums%20](https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spin#:~:text=Spin%20(von%20englisch%20spin%20E2%80%9ADrehung,Spinquantenzahl)%20des%20eduzierten%20planckschen%20Wirkungsquantums%20). (zuletzt abgerufen am 17.07.21, 13.15 Uhr).

spezifisches Teilchen als Eigenschaft benötigt, um über die Wechselwirkung mit anderen Teilchen in Beziehung zu treten. Dazu ist jede heute bekannte fundamentale Wechselwirkung im Besitz eines universellen Kopplungsparameters,  $\alpha$  i. Dieser gibt die Stärke der jeweiligen Wechselwirkung an.<sup>4</sup> Jede Wechselwirkung wird zudem durch ein sogenanntes Austauschteilchen vermittelt. Quarks im spezifischen unterliegen allen vier Wechselwirkungen; der elektromagnetischen- der schwachen-, der starken Wechselwirkungen und der Gravitation. In richtiger Reihenfolge gehören zu den Wechselwirkungen folgende Bosonen, also Wechselwirkungsteilchen: Photon, W- und Z-Boson, und das Gluon. Der Gravitation konnte man noch kein Austauschteilchen zuordnen. Aufgrund der Tatsache, dass Quarks mittels aller Wechselwirkungen interagieren können, müssen sie auch alle geforderten Ladungen besitzen. Welche das sind, was sie charakterisiert und wie sie wirken, erläutere ich im Folgenden.

Dass sich entgegengesetzte Ladungen anziehen, gleiche Ladungen jedoch abstoßen, ist allseits bekannt. Warum das aber so ist, kann man mit Hilfe der elektromagnetischen Wechselwirkung erklären. Sie setzt das Vorhandensein einer elektrischen Ladung  $Z$  des Teilchens voraus. Alle up-artigen Quarks haben demnach eine elektrische Ladung von  $+2/3$ . Alle Generationspartner besitzen eine elektrische Ladung von  $-1/3$ . Der Anteil der Ladung orientiert sich immer an der Ladung eines Elektrons, mit einer negativen Ladung von  $-1$ . Der dazugehörige Kopplungsparameter der elektromagnetischen Wechselwirkung beträgt rund  $1/137$ .<sup>5</sup>

Die vorausgesetzte Ladung zur Interaktion mittels der starken Wechselwirkung, ist die Farbladung bzw. starke Ladung  $\square C$  (Vektor  $C$ ). Die starke Wechselwirkung begründet, weshalb die Protonen in einem Atomkern zusammengehalten werden. Eigentlich stoßen sie sich aufgrund ihrer gleichen elektrischen Ladung ab. Diese Farbe kann man sich allerdings bildlich nicht wirklich als diese vorstellen. Vielmehr stellt jede Farbe einen Vektor in einem zweidimensionalen Farbgitter dar. So existieren drei Vektoren, deren entgegengesetzte Richtung die Antifarben symbolisiert, zu denen ich noch zu sprechen komme.<sup>6</sup> (Bild in Anhang) Außer den Quarks, besitzen nur noch Gluonen selbst eine Farbladung. Alle

---

<sup>4</sup> Vgl. Buch Teilchenphysik Unterrichtsmaterial ab Klasse 10, Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen, Joachim Herz Stiftung, 2. Auflage, 2017, Seite 16, (zuletzt abgerufen am 14.08.21, 18.07 Uhr).

<sup>5</sup> Vgl. ebd. Seite 16, (zuletzt abgerufen am 14.08.21, 18.17 Uhr).

<sup>6</sup> Vgl. Buch Teilchenphysik Unterrichtsmaterial ab Klasse 10, Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen, Joachim Herz Stiftung, 2. Auflage, 2017, Seite 31, (zuletzt abgerufen am 14.08.21, 18.22 Uhr).

Leptonen und weiteren Bosonen sind farbneutral und können somit auch nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen.<sup>7</sup> Insgesamt existieren sechs Farben; rot, grün, blau, sowie antirot (cyan), antigrün (magenta) und antiblau (gelb). Antifarben sind allerdings nur Antimaterie zu zuordnen. Normale Farben gehören demzufolge zu Materie. Quarks schließen sich stets zu größeren Teilchen zusammen, wodurch beispielsweise Neutronen oder Protonen entstehen. Zusammenschlüsse aus zwei Quarks nennt man Mesonen. Baryonen bestehen aus drei Quarks, so Protonen und Neutronen, und Zusammenschlüsse aus beliebig vielen Quarks heißen Hadronen. Gemeinsam haben alle drei, dass ihre Farbladung nach außen hin neutral, also weiß, ist. Mesonen bestehen so aus einem Quark und Antiquark-Paar, denn Farbe und Antifarbe ergeben Farbneutralität. Baryonen enthalten dementsprechend alle drei Farben oder alle drei Antifarben<sup>8</sup>. Bei der starken Wechselwirkung beträgt der Kopplungsparameter  $\frac{1}{2}$  bis  $1/10$ . Anders als bei den anderen Wechselwirkungen, ist er stark abhängig vom Abstand der zwei miteinander wechselwirkenden Teilchen.<sup>9</sup>

Die schwache und vorletzte Wechselwirkung setzt eine gleichnamige Ladung voraus. Die schwache Ladung  $I$ . Mit Hilfe dieser Wechselwirkung sind Prozesse wie die Kernfusion oder der Betazerfall möglich. Der große Unterschied gegenüber den anderen Wechselwirkungen, ist die Reichweite. Diese ist bei der schwachen Wechselwirkung nur sehr gering und wirkt somit nur auf einer kurzen Distanz von  $2 * 10^{-18}$  m. Zum Vergleich: Die gravitative -, sowie die elektromagnetische Wechselwirkung hat eine unendliche Reichweite. Die starke Wechselwirkung wirkt bis zu einer Entfernung zu  $5 * 10^{-15}$  m<sup>10</sup>.  $I$  entspricht bei allen up- artigen Quarks  $+1/2$ , bei allen down-artigen Quarks  $-1/2$ <sup>11</sup>. Die dazugehörige Antimaterie besitzt, so die Charakteristik, die entgegengesetzte Ladung. Alle weiteren Eigenschaften sind identisch. Analog zur gravitativen- und elektromagnetischen Wechselwirkung besitzt auch die schwache Wechselwirkung einen Wert, der maßgebend für die Stärke ist. Der Kopplungsparameter beträgt ungefähr  $1/30$ .<sup>12</sup>

---

<sup>7</sup> Vgl. <https://learnattack.de/schuelerlexikon/physik/farbladung> (zuletzt abgerufen am 17.07.21, 13.35 Uhr).

<sup>8</sup> Vgl. ebd..

<sup>9</sup> Vgl. Buch Teilchenphysik Unterrichtsmaterial ab Klasse 10, Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen, Joachim Herz Stiftung, 2. Auflage, 2017, Seite 18, (zuletzt abgerufen am 14.08.21, 18.28 Uhr).

<sup>10</sup> Vgl. ebd. Seite 24, (zuletzt abgerufen am 14.08.21, 19.20 Uhr).

<sup>11</sup> Vgl. Buch Teilchenphysik Unterrichtsmaterial ab Klasse 10, Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen, Seite 29, (zuletzt abgerufen am 14.08.21, 19.32 Uhr).

<sup>12</sup> Vgl. ebd. Seite 21, (zuletzt abgerufen am 14.08.21, 19.37 Uhr).

Die letzte Wechselwirkung ist gleichzeitig die unerforschteste. Zu ihr ist weder eine nötige Ladung noch eine Austauschteilchen bekannt. Die Rede ist von der Gravitation, bzw. der gravitativen Wechselwirkung. Klar ist, dass sie existiert. Sonst wären die Schwerkraft, die Planetenbahnen oder der Luftdruck keine vorherrschenden Phänomene. Als vorraussetzende Eigenschaft wird trotzdem eine Masse angegeben. Ein Lichtteilchen, ein sogenanntes Photon, beispielsweise, unterliegt der Gravitation nicht. Es ist masselos. Doch ein Wechselwirkungsteilchen, genannt Graviton, konnte in keiner Form festgestellt werden. Die Vereinigung der gravitativen Wechselwirkung mit den anderen drei Wechselwirkung ist Bestandteil der heutigen Forschung und Grundlage zur eigentlichen „Weltformel“.

### 3 Feynman-Diagramme

Da man sich komplexe Zerfälle nur sehr schwer vorstellen kann, ist ein Mittel der Visualisierung sehr hilfreich. Mithilfe sogenannter Feynman-Diagramme ist die Möglichkeit gegeben, solche Vorgänge durch einfache Darstellungen abzubilden, zu berechnen und zu verstehen. Dieses Kapitel folgt an dieser Stelle der Arbeit, um Zerfälle im folgenden Kapitel nachvollziehen zu können. Namensgebend für diese Darstellungsform war der US-amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Phillips Feynman, der diese vereinfachte Veranschaulichung subatomarer Wechselwirkungen erfand.<sup>13</sup> Hinter dem simplen Aufbau der Diagramme verbergen sich jedoch hochkomplexe Formeln und es gibt unzählige Sonderfälle und mögliche Kombinationen, sodass ich hier nur die Grundlagen darlegen werde.

Feynman-Diagramme bestehen aus ein- und auslaufenden Linien, welche die ein- bzw. auslaufenden Teilchen darstellen. Dort wo Linien zusammentreffen, befindet sich ein Wechselwirkungspunkt, auch Vertex genannt. Hier können Teilchen vernichtet, gestreut oder erzeugt werden. Diese Vertices symbolisieren die virtuellen Teilchen und verbinden meist die äußeren ein- oder auslaufenden Linien mit den inneren Linien, genannt Propagatoren.

Das Diagramm selbst ist ein zweidimensionales, Labor- bzw. Koordinatensystem, deren x-Achse der Zeit  $t$  und y- bzw. z-Achse dem Ort  $r$  entspricht. Die Achsen stehen senkrecht aufeinander.

---

<sup>13</sup> Vgl. [https://de.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Feynman](https://de.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman) (zuletzt abgerufen am 28.10.21, 22.34).

Sie werden wie folgt symbolisiert:

Alle Materiateilchen, also Fermionen, stellt man durch eine durchgezogene Linie mit Pfeil dar. Der Pfeil zeigt in Zeitrichtung.

Wichtige Abkürzungen der verschiedenen Fermionen werden im Folgenden aufgelistet:

Elektron (e-)

Proton (p)

Neutron (n)

Neutrino (ν)

Quark (q)

Myon (μ)



14

Alle Antimateriateilchen, also Antifermionen, stellt man durch eine durchgezogene Linie mit Pfeil dar. Hier zeigt der Pfeil jedoch gegen die Zeitrichtung.

Hier ist nur das Positron wichtig zu nennen, es wird durch e+ beschriftet.



15

Alle virtuellen Teilchen der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung werden durch eine wellenförmige Linie ohne Pfeil symbolisiert. Zu ihr zählen das Photon, sowie das W- und Z-Boson.

Um die jeweiligen Bosonen zu unterscheiden, bezeichnet man die Linie mit den entsprechenden Abkürzungen. Das Photon besitzt so das Gamma, die W- und Z-Bosonen jeweils ein W+, W- oder Z<sup>0</sup><sup>16</sup>.

---

<sup>14</sup> Vgl. <https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenphysik/feynman-diagramm/> (zuletzt abgerufen am 13.11.21 21.41 Uhr).

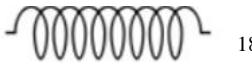
<sup>15</sup> Vgl. ebd. (zuletzt abgerufen am 13.11.21, 21.41 Uhr).

<sup>16</sup> Vgl. ebd. (zuletzt abgerufen am 13.11.21, 21.41 Uhr).



17

Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, die Gluonen, stellt man durch eine spiralförmige Linie ohne Pfeil dar. Die Abkürzung des Gluons ist ein kleines g.



18

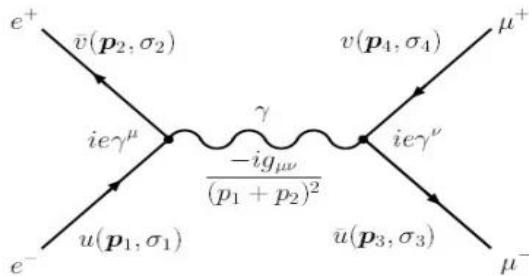
Wie in Kapitel zwei beschrieben, kann weder aus einem Teilchen jedes beliebige andere Teilchen entstehen, noch kann es mit einer beliebigen Wechselwirkung wechselwirken.

Einerseits ist wichtig, dass die Energie- und Erhaltungssätze eingehalten werden. Andererseits müssen Leptonen- und Ladungszahl vor und nach dem Zerfall übereinstimmen. Wichtig ist, dass die Ladung aller beteiligter Teilchen vor der Wechselwirkung bzw. dem Vertex gleich der Ladung aller Teilchen nach der Wechselwirkung bzw. hinter dem Vertex entsprechen.

Damit ein Teilchen mit einer Wechselwirkung wechselwirken kann, muss es deren Ladung besitzen. Welche Wechselwirkung welche Ladung fordert wurde ebenfalls in Kapitel zwei beschrieben.

Die elektromagnetische Wechselwirkung koppelt nur an Teilchen mit einer elektrischen Ladung  $Z$ , also an alle Teilchen außer Neutrinos, das  $Z$ -Boson, Gluonen oder das Higgs-Boson. Ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron, könnten somit per Photon wechselwirken und in ein Myon, sowie ein Antimyon zerfallen:

### Example: $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ in QED



19

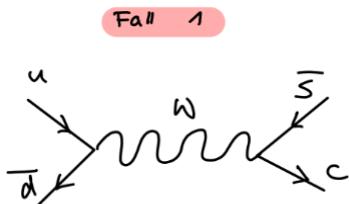
<sup>17</sup> Vgl. <https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenphysik/feynman-diagramm/>, (zuletzt abgerufen am 13.11.21 21.41 Uhr).

<sup>18</sup> Vgl. ebd. (zuletzt abgerufen am 13.11.21, 21.41 Uhr).

<sup>19</sup> Vgl <https://telescopier.wordpress.com/2016/02/15/feynman-diagrams-for-beginners/> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.15 Uhr).

Wie auf der Grafik ersichtlich, steckt hinter jeder Reaktionskomponente eine mathematische Formel bzw. Bezeichnung. Diese sind jedoch nicht eminent für diese Arbeit, da zur Berechnung im Eigenanteil lediglich die Energien und Massen der Teilchen eine Rolle spielen.

Die W- und Z- Bosonen der schwachen Wechselwirkung können nur an die beiden Partner einer Generation koppeln. Hierbei ist jedoch ein Partner ein Antiteilchen, soweit sie gleichzeitig entstehen (Fall 1).



20

Es existieren 3 Generationen, die die Fermionen unterteilen. So gehören folgende Paare zusammen:

Up/Down -Quark

Charm/Strange -Quark

Top/Bottom -Quark

Elektron/Elektron-Neutrino

Myon/Myon-Neutrino

Tau/Tau-Neutrino

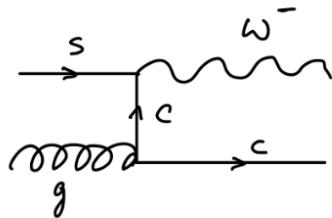
Das jeweilige Boson enthält jeweils die Ladung (+, -, 0), die zur Ladungserhaltung beiträgt. Somit ist die Ladung aller Teilchen vor der Wechselwirkung gleich der Ladung aller Teilchen nach der Wechselwirkung.

Ein Boson der schwachen Wechselwirkung kann auch nur an einen Generationspartner koppeln und so den Partner entstehen lassen, hierbei ist, infolge der Ladungserhaltung, das Fermion ebenfalls positiv (Fall 2).

---

<sup>20</sup> Selbst gezeichnete Grafiken, durch Maximilian Kotz und Vgl. <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/forschung/publikationen/Diplomarbeiten/Baernreuther-dipl.pdf> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr) und Vgl. <https://cds.cern.ch/record/2654632/plots> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr).

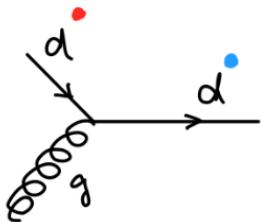
## Fall 2



21

Das Gluon der starken Wechselwirkung koppelt einzig und allein an die Quarks, denn nur sie besitzen, so wie das Gluon selbst, eine Farbladung. Koppelt nun also ein Quark an ein Gluon, so entsteht wiederum das gleiche Quark nur mit einer anderen, der drei verfügbaren, Farbladung:

## Gluonenkopplung



22

## 4 Das Top-Quark

### 4.1 elementare Eigenschaften

Im zweiten Kapitel habe ich bereits alle Eigenschaften der Quarks erläutert, dennoch möchte ich im Folgenden im Spezifischen, die des Top-Quarks aufführen. In meinem Eigenanteil werde ich diese nämlich noch als Grundlage benötigen. Hier ist einzig und allein die Rede des Materie- und nicht des Antimaterieteilchens. Mit einer Masse von  $173.1 \text{ GeV}/c^2$  ist das Top-Quark das schwerste aller Quarks. Somit besitzt es auch nur eine geringe mittlere

---

<sup>21</sup> ebd. .

<sup>22</sup> Selbst gezeichnete Grafiken, durch Maximilian Kotz und Vgl. <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/forschung/publikationen/Diplomarbeiten/Baernreuther-dipl.pdf> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr) und Vgl. <https://cds.cern.ch/record/2654632/plots> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr).

Lebensdauer von  $10^{-25}$  Sekunden<sup>23</sup>. Danach zerfällt es in andere Teilchen. Die Einheit eV, gesprochen Elektronenvolt, ist eine fest definierte Energieeinheit. Ein eV entspricht der Energie, die ein Teilchen mit der Elementarladung 1e erhält, wenn es ein Volt Spannung durchläuft. Im Vakuum würde es so kinetische Energie gewinnen und beschleunigt werden.<sup>24</sup> Wie oben genannt hat jedes Quark einen Spin von  $1/2$ , so auch das Top-Quark. So wie alle up-ähnlichen Quarks, besitzt es außerdem eine elektrische Ladung von  $+2/3$  und eine schwache Ladung von  $+1/2$ . Das Top-Quark existiert zu dem ebenfalls in allen drei Farbladungen: rot, grün, blau.

## 4.2 Entstehung

Das Top-Quark kann auf viele Art und Weisen entstehen. Im Folgenden werden jedoch nur die zwei wahrscheinlichsten Vorgänge erläutert. Top-Quarks können unter anderem einzeln, aber auch als Teilchen-Antiteilchen-Paar entstehen.

Bei der tt-Paarerzeugung entstehen die Quarks mittels der starken Wechselwirkung durch Gluonen.<sup>25</sup> So könnten sich zwei reelle Gluonen zu einem virtuellen Gluon vereinigen, woraus ein Top-Quark-Anti-Top-Quark-Paar entstünde (I).<sup>26</sup> Virtuelle Gluonen sind eine Art „Zwischenprodukte“ in dem Zerfall, reelle Gluonen hingegen stellen die Ausgangsteilchen bzw. die Endprodukte.<sup>27</sup>

Genauso könnten ein Up- und ein Anti-Down-Quark mittels eines W+-Bosonen und eines Gluons wechselwirken und ebenfalls ein Top-Anti-Top-Paar erzeugen (II).

---

<sup>23</sup> Vgl. <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/das-top-quark/> (zuletzt abgerufen am 03.09.21, 14.31 Uhr).

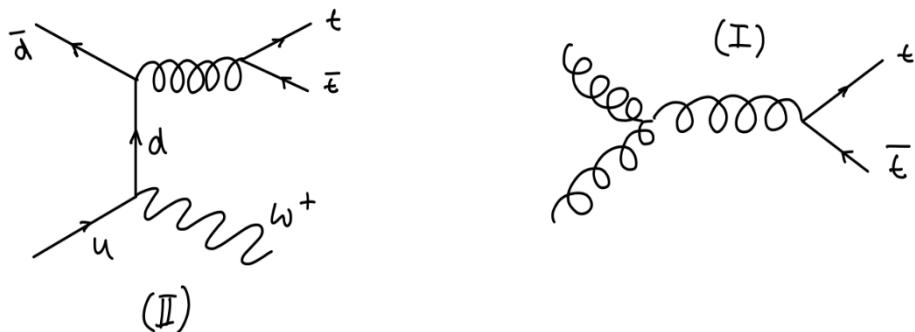
<sup>24</sup> Vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Elektronenvolt.html> (zuletzt abgerufen am 28.10.21, 22.22 Uhr)

<sup>25</sup> Vgl. [https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0607/sprenger\\_ausarbeitung.pdf](https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0607/sprenger_ausarbeitung.pdf) (zuletzt abgerufen am 03.09.21, 20.07 Uhr).

<sup>26</sup> Vgl. <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/forschung/publikationen/Diplomarbeiten/Baernreuther-dipl.pdf> (zuletzt abgerufen am 28.10.21, 22.10).

<sup>27</sup> Mündliche Quelle, Maximilian Kotz, 03.03.22, 15.08 Uhr.

## Top-Anti-Top-Quark-Produktion

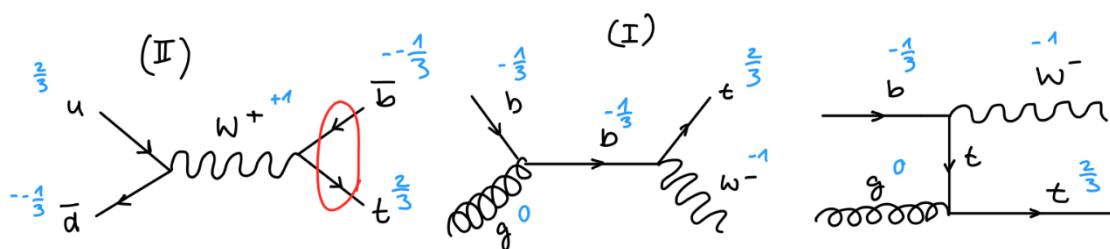


28

Einzelne Quarks können durch die schwache Wechselwirkung und den dazugehörigen Bosonen entstehen. Auch hier möchte ich zwei Beispiele näher erläutern.

Es könnte ein Bottom-Quark mit einem Gluon wechselwirken, wodurch es sein Farbladung ändert. Anschließend könnte es ein W- -Boson emittieren und somit ein Top-Quark entstehen lassen (I). Ebenfalls könnte ein up-artiges Teilchen und das dazugehörige down-artige Antiteilchen mit einem W+ -Boson wechselwirken, wodurch die Generationspartner Top-Quark und Anti-Bottom-Quark entstehen könnten (II). Ein Beispiel eines etwas komplizierteren Zerfalls ist auf der rechten Seite der Grafik zu sehen.

## Einzel-Top-Quark-Produktion



29

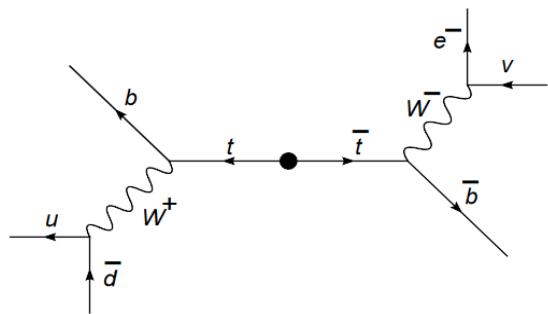
Die blauen Zahlen stellen die Ladungen der Elementarteilchen dar und dienen allein der Orientierung und der Veranschaulichung der Ladungserhaltung.

<sup>28</sup> Selbst gezeichnete Grafiken, durch Maximilian Kotz und Vgl. <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/forschung/publikationen/Diplomarbeiten/Baernreuther-dipl.pdf> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr) und Vgl. <https://cds.cern.ch/record/2654632/plots> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr).

<sup>29</sup> ebd. .

### 4.3 Zerfall

Da die Lebensdauer des Top-Quarks mit ungefähr  $10^{-25}$  Sekunden extrem kurz ist, kann es nur durch seine Zerfallsprodukte nachgewiesen werden. Nach den Definitionen des Standardmodells, kann es in ein W-Boson und ein Bottom, Strange-, oder Down-Quark zerfallen. Aufgrund komplexerer Hintergründe ist der erste Fall jedoch der wahrscheinlichste, weshalb ich mich auf diesen beschränke.



30

---

<sup>30</sup> Vgl. <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/forschung/publikationen/Diplomarbeiten/Baernreuther-dipl.pdf> (zuletzt abgerufen am 14.11.21, 20.00 Uhr).

## 5 Berechnungen zur Wahrscheinlichkeit der Detektion schwererer Quarks am LHC

Der folgende Text wird sich der grundlegenden Frage dieser Arbeit widmen. Das Ziel ist es, zu berechnen, welche maximale Masse aus der Energie eines Protons, welches in einem Ringbeschleuniger auf eine bestimmte Geschwindigkeit beschleunigt wird, gewonnen werden kann. Hierbei beziehen sich die Berechnungen auf den weltweit größten Ringbeschleuniger, dem LHC (Large Hadron Collider) in Genf<sup>31</sup>. Dies ermöglicht es eine „Grundenergie“, genannt Schwerpunktsenergie, zu ermitteln. Diese ist nur ein Teil der vom Beschleuniger aufgebrachten Energie, dennoch steht nur die Schwerpunktsenergie zur Verfügung, um in Anregungsenergie oder die Masse neuer Teilchen umgewandelt zu werden.<sup>32</sup> Im Falle des LHC beträgt diese 14TeV.<sup>33</sup> Diese macht es möglich, das Proton auf 299.792.455 Meter pro Sekunde zu beschleunigen, das sind nur 3 Meter pro Sekunde weniger als Lichtgeschwindigkeit<sup>34</sup>.

Im Laufe der Beschleunigung wird das Proton immer massereicher, durch die maximal gegebene Geschwindigkeit lässt sich so die maximale Masse des Protons kalkulieren. Dabei wird sowohl die eigentliche Kollision zweier Protonen im Teilchenbeschleuniger als auch der Energieverlust beim Zerfall vernachlässigt. Diese errechnete maximale Masse wird anschließend der des bisher schwersten detektierten Quark beziehungsweise Elementarteilchen, dem Top-Quark, gegenübergestellt.

Die Berechnungen fundieren grundlegend auf Einsteins postulierter speziellen Relativitätstheorie, in der er die Energie mit der Summe aus der Masse und der quadrierten Lichtgeschwindigkeit gleichsetzt. Im Falle der Berechnung einer Ruheenergie, also der Energie eines Teilchens ohne Geschwindigkeit, wird sich auf die Ruhemasse bezogen.

Allgemein setzt sich die Gesamtenergie  $E_G$  des beschleunigten Protons aus seiner Ruheenergie  $E_0$  und seiner kinetischen Energie  $E_{kin}$  mit einbezogener Geschwindigkeit

---

<sup>31</sup> Alle Berechnungen sind mit dem externen und internen Betreuer (Steffi Tiebel, Maximilian Kotz) aus eigenem Wissen erarbeitet worden. Zeitraum: 11.-12.2022.

<sup>32</sup> Vgl. <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Schwerpunktsenergie> (zuletzt abgerufen am 30.12.21, 17.33 Uhr).

<sup>33</sup> Vgl. <https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0607/sammet.pdf> (zuletzt abgerufen am 30.12.21, 17.34 Uhr).

<sup>34</sup> Vgl. <https://www.leifiphysik.de/optik/lichtausbreitung/grundwissen/lichtgeschwindigkeit> (zuletzt abgerufen am 30.01.22, 22.52 Uhr).

zusammen. Diese Bestandteile werden zunächst berechnet, um abschließend die Summe daraus, die Gesamtenergie, mit Hilfe von  $E=mc^2$  in die Masse umzurechnen.

Für die Berechnung der kinetischen Energie kann man sich nicht mehr auf die allgemein gültige Gleichung  $E_{kin}=m/2*v^2$  stützen. Diese Zusammenhänge gelten für sehr schnelle Teilchen nicht mehr. Hier gilt, dass die kinetische Energie der elektrischen Energie entspricht.<sup>35</sup> Diese ist mit den möglichen 14 TeV des LHC gegeben. Allerdings beträgt sie für diese Berechnungen nur die Hälfte, 7 TeV<sup>36</sup>, da wir uns nur auf ein Proton beschränken. Für weitere Berechnungen ist es wichtig die Einheit Elektronenvolt in Joule umzurechnen. Hierzu multipliziert man mit der Elementarladung e pro eV. Diese beträgt  $1,602*10^{-19}$  J/eV. Weshalb man ausgerechnet diese Größe benötigt würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, wichtig ist jedoch zu wissen, dass sie hilft, Elektronenvolt in Joule umzurechnen. Bei der Umrechnung von 7TeV erhält man ein Ergebnis von  $1,1214*10^{-6}$ J. Da die Werte noch für weitere Berechnungsschritte benötigt werden, bleiben sie so genau wie möglich und werden nicht gerundet.

Die Ruheenergie eines Protons lässt sich durch Recherche ermitteln und beträgt 938MeV. Diesen Wert muss man nun ebenfalls in Joule umrechnen, auch hier mit Hilfe der Elementarladung. Es lässt sich ein Wert von  $1,502676*10^{-10}$ J errechnen.

Um die Gesamtenergie des Protons zu errechnen, bildet man die Summe der kinetischen- und der Ruheenergie. Das Ergebnis beträgt  $1,121550268*10^{-6}$ J.

Abschließend formt man die Formel  $E_G=m_p*c^2$  äquivalent um, in dem man durch  $c^2$  teilt und somit die Masse des Protons  $m_p$  isoliert. Die finale Masse eines beschleunigten Protons lässt sich somit aus dem Quotienten von der Gesamtenergie des Protons und der quadrierten Lichtgeschwindigkeit errechnen. Ein Proton besitzt bei einer maximalen Geschwindigkeit von drei Meter pro Sekunde unter der Lichtgeschwindigkeit eine Masse von  $1,247892968*10^{-23}$  Kilogramm. Gerundet ergibt dies eine Masse von  $1,25*10^{-23}$  Kilogramm.

Dieser maximal möglichen Masse eines Zerfallsproduktes des Protons stellen wir die tatsächliche Masse des Top-Quarks gegenüber. Dazu wird die Ruheenergie des Top-Quarks,

---

<sup>35</sup> Vgl. [https://www.solstice.de/grundl\\_d\\_tph/exp\\_relat/exp\\_relat\\_01.html](https://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_relat/exp_relat_01.html), (zuletzt abgerufen am 30.01.22, 22.50 Uhr).

<sup>36</sup> Vgl. <https://www.weltderphysik.de/gebiete/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger-anlagen/large-hadron-collider-lhc/haeufige-fragen-zum-lhc/>, (zuletzt abgerufen am 30.01.22, 22.55 Uhr).

welche  $1,731 \cdot 10^{-11} \text{ eV}$  beträgt, zunächst in  $2,773062 \cdot 10^{-8} \text{ J}$  umgerechnet. Anschließend wird dieser Wert in die Gleichung  $E = m_0 c^2$  eingesetzt, um nach einer äquivalenten Umformung die Ruhemasse des Top-Quarks  $m_0$  mit  $3,08544759 \cdot 10^{-25} \text{ Kilogramm}$  zu kalkulieren.

Um diesen Wert in Verhältnis mit der Gesamtmasse des Protons zu setzen, bildet man den Quotienten der beiden Massen und erkennt, dass die Masse des Top-Quarks nur 2,47% der zur Verfügung stehenden Gesamtmasse des Protons für seine Masse beansprucht. 97,53% der Energie wurden nicht genutzt.

## Eigenanteil

\* Berechnung der maximalen Masse eines Teilchen, welches aus der Energie eines Protons entsteht

geg.:  $C = 299\ 792\ 458 \frac{m}{s}$   
 $E_{op} = 938 \text{ MeV}$  ... Ruhenergie Proton  
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{C}{eV}$  ... Elementarladung  
 $E_{el} = 7 \text{ TeV}$  ... Elektrische Energie etc  
 $v_p = 299\ 792\ 458 \frac{m}{s}$  ... Geschwindigkeit Proton

lsg.:  $E = m \cdot c^2 \rightarrow E_0 = m_0 \cdot c^2$

$E_0$  ... Ruhenergie  
 $m_0$  ... Ruhemasse

$E_G = E_{kin} + E_0$   $E_G$  ... Gesamtenergie Proton

1. Schritt:  $E_G$  berechnen

(1)  $E_{kin}$

(2)  $E_0$

2. Schritt:  $E_G$  mit  $E = m \cdot c^2$  in Masse umrechnen (3)

(1) Für sehr schnelle Teilchen ist  $E_{kin} = \frac{m}{2} v^2$  falsch!

Dann gilt:  $E_{kin} = E_{el} = 7 \text{ TeV}$

umgerechnet in  $J$ :  $E_{kin} = 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{J}{eV}$   
 $= 1,1214 \cdot 10^{-6} J$

(2)  $E_0 = E_{op} = 938 \text{ MeV} = 9,38 \cdot 10^8 \text{ eV}$

umgerechnet in  $J$ :  $E_0 = 9,38 \cdot 10^8 \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{J}{eV}$   
 $= 1,502676 \cdot 10^{-10} J$

$E_G = E_{kin} + E_0 = 1,1214 \cdot 10^{-6} J + 1,502676 \cdot 10^{-10} J$   
 $= 1,121550268 \cdot 10^{-6} J$

(3)  $E_G = m_p c^2 \quad | : c^2$   
 $m_p = \frac{E_G}{c^2} = \frac{1,121550268 \cdot 10^{-6} J}{(299\ 792\ 458 \frac{m}{s})^2}$

$m_p = \frac{1,1217892968 \cdot 10^{-23} \text{ kg}}{(\text{Gesamtmasse Proton})}$

zum Vergleich

Ruhemasse des Top Quarks: ( $m_{\text{top}}$ )

$$E_{\text{kin}} = 173,1 \text{ GeV} \quad \dots \text{ Ruhenergie Top-Quark} \\ = 1,731 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

$$\text{umgerechnet in J: } E = 1,731 \cdot 10^{12} \text{ eV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \\ = 2,773062 \cdot 10^{-8} \text{ J}$$

$$m_{\text{top}} = \frac{E}{c^2} = \frac{2,773062 \cdot 10^{-8} \text{ J}}{(299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} \\ = 3,08544759 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

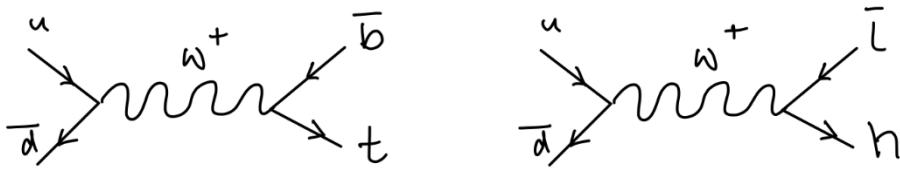
$$\hookrightarrow m_{\text{top}} < m_p$$

Anteil:  $\frac{m_{\text{top}}}{m_p} = 0,02469559411$

$$\approx 2,47 \%$$

$$\Rightarrow 97,53\% \text{ nicht genutzt}$$

Wie in vorherigen Kapiteln beschrieben kann ein Proton nicht einfach so in ein Top-Quark zerfallen. Um zu erkennen wieviel Energie tatsächlich in Teilchen umgewandelt wird, berechnen wir einen Beispielzerfall. Man nehme an, dass das massereichere Quark auf gleiche Art wie das Top-Quark entstehen kann, da sich außer der Masse und der daraus kürzeren Lebensdauer keine Eigenschaften verändern. Es besitzt somit ebenfalls wie jedes Quark einen Spin von  $1/2$ , eine elektrische Ladung von  $+2/3$  und eine schwache Ladung von  $+1/2$ . Auch das neue Quark existiert zudem in allen drei Farbladungen: rot, grün, blau. Somit wäre es ihm möglich über dieselben Wechselwirkung wechsel zu wirken wie das Top-Quark. Somit betrachten wir einen der häufigsten Zerfälle in der das Top-Quark entstehen kann und gehen davon aus, dass auch das massereichere Quark auf diese Weise entstehen könnte.



37

Da ein Up-Quark und ein Anti-Down-Quark nur  $2/3$  eines Protons sind, besitzen sie auch eine geringere Gesamtmasse, die umgewandelt werden kann. Da der Energieerhaltungssatz stets gilt, die Masse jedoch nicht konstant bleibt, sondern nach dem Zerfall durch verschiedene Einflüsse nicht der Masse vor dem Zerfall entspricht, eignet es sich mit den Energien zu rechnen. Berechnet man nun jeweils die Ruheenergien von Up- und Anti-Down-Quark und addiert diese zu den jeweiligen identischen kinetischen Energien, so erhält man eine Gesamtenergie der beiden Quarks von  $7,476011053 \cdot 10^{-7}$  Joule. Die kinetischen Energien berechnen sich dabei mit der Annahme, die Quarks bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit wie das Proton. Die Quarks annihilieren sich zu einem  $W^+$ -Boson, welches die Energie wiederum in ein Top- und ein Anti-Bottom-Quark aufteilt. Wenn wir davon ausgehen, dass ein schwereres Quark entsteht, dann muss zwingend sein Generationspartner mitentstehen. Wir nennen die beiden Quarks High- und Low-Quark. Das High-Quark ist hierbei ein up-artiges-, das Low-Quark ein down-artiges Quark. Damit die Feynman-Regeln nicht verletzt werden, kann das High-Quark nur zusammen mit einem **Anti**-Low-Quark entstehen. Um den Grenzfall zu bestimmen, setzen wir die Masse des High-Quarks auf 100%. Der Generationspartner ist somit masselos. Der Grenzwert gibt an, welche Masse maximal vom LHC detektiert werden kann. Hierbei beschränken wir uns auf die Entstehung durch die Annihilation durch ein Up- und ein Anti-Down-Quark. Hätte das High-Quark einen Masseanteil von 100% der Gesamtmasse von Up- und Anti-Down-Quark, so hätte es eine Masse von  $8,308204375 \cdot 10^{-24}$  Kilogramm. Das entspricht einer Energie von 4,666673566 TeV. Das Top-Quark besitzt im Gegensatz dazu nur eine Masse von 0,1731TeV. Somit könnte das High-Quark sogar einen Masseanteil von der Gesamtmasse des Protons von 66,578% ausmachen. Allerdings ist es sehr unwahrscheinlich, dass das Anti-Low-Quark

<sup>37</sup> Selbst gezeichnete Grafiken, durch Maximilian Kotz und Vgl. <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/forschung/publikationen/Diplomarbeiten/Baernreuther-dipl.pdf> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr) und Vgl. <https://cds.cern.ch/record/2654632/plots> (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.50 Uhr).

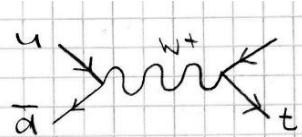
masselos ist. Durch seine fehlende Masse wäre es schon sehr früh entdeckt worden. Bisher wurde jedoch nichts dergleichen festgestellt.

Deshalb gehen wir im zweiten Schritt davon aus, beide Quarks der vierten Generation seien gleich schwer. Auch dieser besondere Fall ist eher unwahrscheinlich, dennoch wahrscheinlicher als der erste Fall. Beide Quarks hätten somit eine Masse von  $4,154102188 \cdot 10^{-24}$  Kilogramm. Deren jeweilige Energie betrüge 2,333336738 TeV.

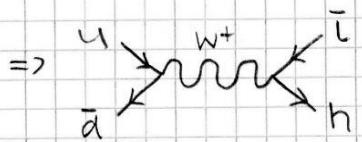
Man könnte im letzten Schritt davon ausgehen, dass die Masse des Anti-Low-Quarks höher als die des High-Quarks ist, auch wenn bei den bisherigen Generationen immer das up-artige Quark als massereicher nachgewiesen werden konnte. Wenn es dabei zusammen mit dem High-Quark die Gesamtenergie übersteige, so ist es naheliegend, dass das High-Quark nur mit einem anderen leichteren Quark oder Elementarteilchen entstehen kann. Denn die Gesamtenergie vor dem Zerfall entspricht der Gesamtenergie nach dem Zerfall; so der Energieerhaltungssatz. Wenn die Gesamtmasse bzw. die Gesamtenergie aus High- und Anti-Low-Quark nicht die gegebenen „Ressourcen“ an Energie übersteigt, das down-artige Quark jedoch massereicher ist, so könnten beide Quarks gemeinsam entstehen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch diese Variante eher unwahrscheinlich ist, da bisher in allen Generationen stets das up-artige Quark massereicher war. Umso schwerer das down-artige Quark wird, desto wahrscheinlicher ist, dass das High-Quark zusammen mit einem anderen leichteren down-artigen Quark entsteht.<sup>38</sup>

---

<sup>38</sup> Mündliche Quelle, Maximilian Kotz, 03.03.22, 15.06 Uhr.



- (1)  $m_h = 100\%$ ;  $m_{\bar{t}} = 0$   
 (2)  $m_h = m_{\bar{t}} \Rightarrow 100\%$ .  
 (3)  $m_h < m_{\bar{t}} \Rightarrow 100\%$ .



h... high quark  
 \bar{t}... anti low quark

Annahme:

- u &  $\bar{d}$  haben  $v = v_p$  (Geschwindigkeit Proton)  
 $\hookrightarrow E_a = E_{u\text{kin}} + E_{\bar{d}\text{kin}} + E_{u0} + E_{\bar{d}0}$
- $E_a$  wird vollständig in Masse von den entstehenden Quarks umgewandelt  
 $\hookrightarrow$  haben keine  $E_{\text{kin}}$ , nur  $E_0$

①  $E_a$  von u +  $\bar{d}$  berechnen

$\hookrightarrow E_{u\text{kin}} \& E_0$  der beiden Quarks

② (1) berechnen

③ (2) berechnen

④ (3) berechnen

① u - Quark:

$$E_{u\text{kin}} = E_{u0} = \frac{7}{3} \text{ TeV}$$

$$E_{u\text{kin}} = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

in Joule:

$$E_{u\text{kin}} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$$

$$E_{u\text{kin}} = 3,738 \cdot 10^{-7} \text{ J}$$

$$E_{u\text{kin}} + E_{u0} = E_{u0} = \underline{3,738003524 \cdot 10^{-7} \text{ J}}$$

$$m_{u0} = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{\text{c}^2}$$

$$E = m \cdot c^2$$

$$\Rightarrow E_0 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ eV}$$

in Joule:

$$E_0 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$$

$$E_0 = 3,524 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$E_{u\text{kin}} + E_{u0} = E_{u0} = \underline{3,738003524 \cdot 10^{-7} \text{ J}}$$

$\bar{d}$  - Quark:

$$\begin{aligned}E_{\bar{d}\text{kin}} &= E_{\text{kin}} \\&= 3,738 \cdot 10^{-7} \text{ J}\end{aligned}$$

$$m_{\bar{d}0} = 4,7 \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{\text{c}^2}$$

$$E_{\bar{d}0} = m_{\bar{d}0} \cdot c^2$$

$$\rightarrow E_{\bar{d}0} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ eV}$$

in Joule:

$$E_{\bar{d}0} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$$

$$= 7,5294 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$E_{\bar{d}\text{kin}} + E_{\bar{d}0} = E_{\bar{d}G} = 3,738007529 \cdot 10^{-7} \text{ J}$$

$$E_G = E_{uG} + E_{\bar{d}G} = 7,476011053 \cdot 10^{-7} \text{ J}$$

② (1)  $m_h = 100\%$  von  $E_G$

$$- m_{\bar{c}} = 0$$

$E_G$  in  $m$  umrechnen:

$$E_G = m \cdot c^2 \quad | : c^2$$

$$m = \frac{E_G}{c^2} = \frac{7,476011053 \cdot 10^{-7} \text{ J}}{(299\,972\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}$$

$$m_{ho} = \underline{\underline{8,308204375 \cdot 10^{-24} \text{ kg}}}^* \quad *^1$$

$$\Rightarrow E_G \text{ in eV} = E_G : 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$$

$$\rightarrow E_{ho} = \underline{\underline{4,666673566 \cdot 10^{12} \text{ eV}}}$$

$$\Rightarrow 4,666673566 \text{ TeV}$$

$$\text{vergleich: } E_{ho} = 173,1 \text{ GeV}$$

Dann wäre das Con-Quark masselos!

(2)  $m_h = 50\%$  von  $E_G$

$$m_{\bar{c}} = 50\% \text{ von } E_G$$

$$\rightarrow E_{ho} = E_{\bar{c}0} = \frac{4,666673566 \cdot 10^{12} \text{ eV}}{2}$$

$$= \underline{\underline{2,333336783 \text{ TeV}}}$$

$$\rightarrow m_{ho} = m_{\bar{c}0} = \frac{8,308204375 \cdot 10^{-24} \text{ kg}}{2}$$

$$= \underline{\underline{4,154102188 \cdot 10^{-24} \text{ kg}}}$$

$$*^1 \text{ Anteil Gesamtmasse Proton} = \frac{m_{ho}}{m_{\text{proton}}} = 66,578\%$$

## 6 Fazit

Bisher macht das schwerste Quark, das Top-Quark, gerade mal einen Anteil von 2,47% von dem Masseanteil aus, den ein beschleunigtes Proton am LHC besitzt. Wir betrachten hierbei stets die errechneten Ruhemassen. Somit ist es nicht unwahrscheinlich, dass schwerere Quarks existieren und sogar mit der verfügbaren Energie des LHCs nachgewiesen werden können. Durch seine Beschleunigung am LHC erreicht ein Proton eine Masse von bis zu  $1,247892968 \cdot 10^{-23}$  Kilogramm. Beim genaueren Betrachten des Entstehungsprozesses eines Quarks fiel jedoch auf, dass ausschließlich  $2/3$  der Energie bzw. Masse dieses Protons genutzt werden. Das schwerstmögliche Quark, welches hierbei detektiert werden könnte, dürfte eine maximale Masse von  $8,308204375 \cdot 10^{-24}$  Kilogramm besitzen. Das entspricht ungefähr dem 27-fachen der Masse des Top-Quarks. Aus den drei Generationen der Quarks wird klar, dass jedes Quark einen Generationspartner benötigt. Könnte man also ein schwereres Quark nachweisen, so muss ein weiteres Quark dieser Generation ebenfalls zu finden sein. In welchem Masseverhältnis beide Quarks stehen, darüber lässt sich nur spekulieren. Es ist jedoch eher unwahrscheinlich, dass das down-artige Quark masselos ist, genauso wenig, wie, dass beide Massen exakt gleich groß sind. Auch der Fall, in dem das down-artige Quark die Masse des up-artigen Quarks übersteigt, wäre eine Anomalie bezüglich der bisherigen nachgewiesenen Muster der Generationen. Somit liegt die Masse eines potenziellen neuen up-artigen Quarks am wahrscheinlichsten irgendwo unter der kritischen Masse von  $8,308204375 \cdot 10^{-24}$  Kilogramm und die des Generationspartners in einem Bereich, der sowohl unter der Masse des up-artigen Quarks als auch unter der Gesamtmasse, die zur Verfügung steht.

Dennoch ist zu beachten, dass bei den Berechnungen sehr viele Annahmen getroffen wurden. Es wurde davon ausgegangen, dass die Energie des Protons vollständig ohne Verluste bei der Umwandlung in neue Teilchen verwendet wird. Ebenfalls wurde festgesetzt, dass diese Energie ausschließlich in Masse, jedoch nicht in die eigene kinetische Energie der neuen Teilchen investiert wird. Auch der Entstehungsprozess der neuen Quarks ist nur eine mögliche Variante, die betrachtet wurde. All diese Berechnungen gehen somit von konkreten mathematisch möglichen Zerfällen aus, die jedoch nicht zwingend Realität werden müssen. Theoretisch ist vieles möglich, aber erst wenn Messungen und Theorie übereinstimmen, stützen sie die Vermutung.

Möglicherweise ist dieser Rahmen der 27-fachen Masse jedoch zu eng und uns fehlen schlecht hin die Mittel, schwerere Quarks nachzuweisen, da wir die Energien (noch) nicht aufbringen können. Allerdings steht die Planung eines noch größeren Teilchenbeschleunigers, dem FCC (Future Circulum Collider), in Aussicht. Statt einem Umfang von 27 Kilometern umfasst dieser eine Beschleunigungsstrecke von 100 Kilometern. Durch diese Ausmaße könnte es in Zukunft möglich sein, noch viele weitere energiereichere Elementarteilchen nachzuweisen. Es ist sogar denkbar, dass dadurch unser Verständnis über die kleinsten Bausteine unserer Welt komplett auf den Kopf gestellt wird.

## Literaturverzeichnis:

### Textquellen:

- [https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Netzwerk\\_Teilchenwelt/Material\\_Lehrkraefte/Standardmodell\\_Infos\\_01.pdf](https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Standardmodell_Infos_01.pdf)  
(zuletzt abgerufen am 17.07.21, 12.00 Uhr)
- <https://slideplayer.org/slide/4956204/16/images/5/Quarks+und+Leptonen+Massen+in+MeV+Die+Masste+des+top-Quarks.jpg>  
(zuletzt abgerufen am 17.07.21, 12.00 Uhr)
- [https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spin#:~:text=Spin%20\(von%20englisch%20spin%20%E2%80%9ADrehung,Spinquantenzahl\)%20des%20reduzierten%20planckschen%20Wirkungsquantums%20.](https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Spin#:~:text=Spin%20(von%20englisch%20spin%20%E2%80%9ADrehung,Spinquantenzahl)%20des%20reduzierten%20planckschen%20Wirkungsquantums%20.)  
(zuletzt abgerufen am 17.07.21,)
- <https://learnattack.de/schuelerlexikon/physik/farbladung>  
(zuletzt abgerufen am 17.07.21, 13.35 Uhr)
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Feynman](https://de.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman)  
(zuletzt abgerufen am 28.10.21, 22.34)
- <https://www.philoclopedia.de/einzeldisziplinen/quantenphysik/feynman-diagramm/>  
(zuletzt abgerufen am 13.11.21 21.41 Uhr)
- <https://telescopier.wordpress.com/2016/02/15/feynman-diagrams-for-beginners/>  
(zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.15 Uhr)
- <https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/forschung/publikationen/Diplomarbeiten/Baernreuther-dipl.pdf>  
(zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr)
- <https://cds.cern.ch/record/2654632/plots>  
(zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.00 Uhr)
- <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/das-top-quark/>  
(zuletzt abgerufen am 03.09.21, 14.31 Uhr)
- <https://www.chemie.de/lexikon/Elektronenvolt.html>  
(zuletzt abgerufen am 28.10.21, 22.22 Uhr)

- [https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0607/sprenger\\_ausarbeitung.pdf](https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0607/sprenger_ausarbeitung.pdf)  
(zuletzt abgerufen am 03.09.21, 20.07 Uhr).
- <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Schwerpunktsenergie>  
(zuletzt abgerufen am 30.12.21, 17.33 Uhr)
- <https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0607/sammet.pdf>  
(zuletzt abgerufen am 30.12.21, 17.34 Uhr)
- <https://www.leifiphysik.de/optik/lichtausbreitung/grundwissen/lichtgeschwindigkeit>  
(zuletzt abgerufen am 30.01.22, 22.52 Uhr)
- [https://www.solstice.de/grundl\\_d\\_tph/exp\\_relat/exp\\_relat\\_01.html](https://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_relat/exp_relat_01.html),  
(zuletzt abgerufen am 30.01.22, 22.50 Uhr)
- <https://www.weltderphysik.de/gebiete/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger-anlagen/large-hadron-collider-lhc/haeufige-fragen-zum-lhc/>,  
(zuletzt abgerufen am 30.01.22, 22.55 Uhr)

## Bildquellen:

- [https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell\\_der\\_Teilchenphysik](https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell_der_Teilchenphysik)  
(zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.43 Uhr)

## Literatur:

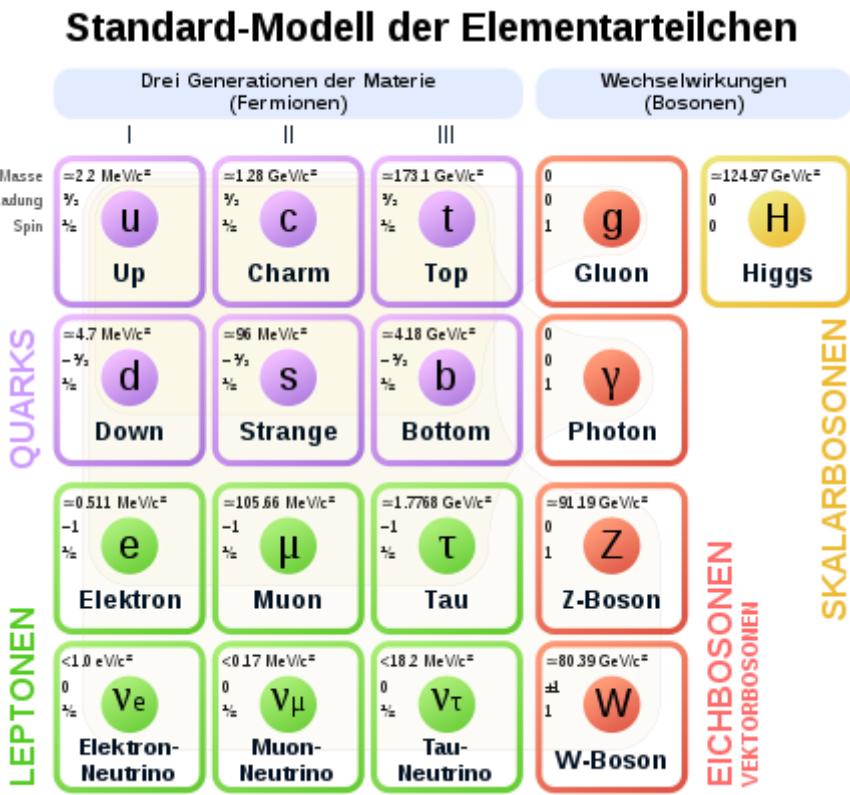
- Teilchenphysik Unterrichtsmaterial ab Klasse 10, Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen, Joachim Herz Stiftung, 2. Auflage, 2017

## Mündliche Quellen:

- Frau Steffie Tiebel (interne Betreuerin)
- Herr Maximilian Kotz (externer Betreuer)

## Anhang:

(I)



39

<sup>39</sup> Vgl. [https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell\\_der\\_Teilchenphysik](https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell_der_Teilchenphysik) (zuletzt abgerufen am 09.03.22, 19.43 Uhr).

## **Selbständigkeitserklärung:**

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit zum Thema „Berechnungen zur Wahrscheinlichkeit der Detektion schwererer Quarks am LHC“ selbständig angefertigt und nur die im Quellenverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Freital, 28.03.2022

