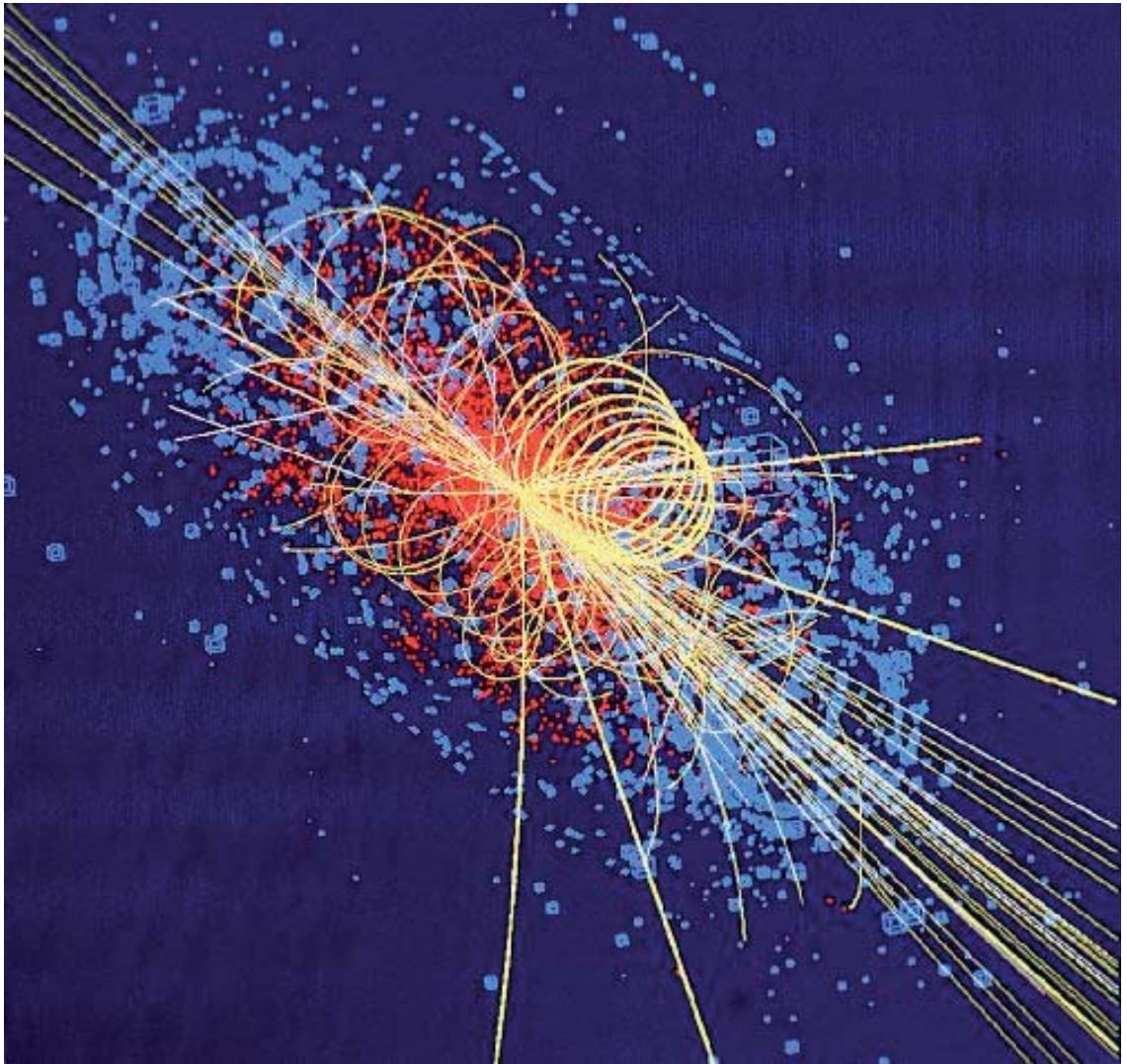


Dem Ursprung der Massen auf der Spur



**Eine Facharbeit im
Leistungskurs Physik
von Iris Wieser**



Facharbeit der Kollegstufe

Abiturjahrgang 2008/2010

Kurs: _____

Kursleiter: _____

Verfasser: _____

Thema: _____

Abgabetermin: _____

Note: _____

Punkte: _____

Dem Direktorat vorgelegt am: _____

Punkte eingetragen am: _____

Unterschrift des Kursleiters: _____

Inhaltsverzeichnis

1. Wissensdrang der Menschheit	3
2. Standardmodell	4
2.1 Materieteilchen.....	4
2.1.1 Leptonen.....	4
2.1.2 Quarks.....	4
2.1.3 Generationen.....	4
2.1.4 Antiteilchen.....	5
2.2 Kraftteilchen.....	5
2.3 Eigenschaft Spin.....	6
2.4 Eichsymmetrie.....	6
3. Begriff Masse	8
4. Masse als Wechselwirkung	8
4.1 Higgs-Mechanismus.....	8
4.2 Higgs-Feld.....	9
4.2.1 Skalarfeld.....	9
4.2.2 Potential.....	10
4.3 Das Higgs-Boson.....	11
4.3.1 Eigenschaften.....	11
4.3.2 Masse.....	12
4.3.3 Entstehung und Zerfall.....	13
4.3.4 Suche beim LHC.....	13
4.4 Schwächen.....	13
4.5 Erweiterungen.....	14
5. Ausblick	15
6. Literaturverzeichnis.....	16
7. Anhang.....	20

1. Wissensdrang der Menschheit

Warum werden über vier Milliarden Euro für den Bau eines weiteren Teilchenbeschleunigers, dem LHC bei Genf, ausgegeben? Diese Frage wurde innerhalb der letzten Jahren wahrscheinlich des Öfteren gestellt.

Schon Bertolt Brecht ließ Galilei antworten: „Ich ließe mich zehn Klafter unter der Erde in einen Kerker einsperren, zu dem kein Licht mehr dringt, wenn ich dafür erführe, was das ist: Licht“¹

Dieses Streben nach Erkenntnis „was die Welt im Innersten zusammenhält“² ist die Mutter aller Wissenschaften. Dank dieser Wissbegier können wir heute erklären, warum der Apfel vom Baum fällt, warum die Erde um die Sonne kreist und wie eine Glühbirne funktioniert. Schon von Anfang an versuchte der Mensch den Ursprung des Universums zu ergründen. In den vergangenen Jahrzehnten haben Physiker die Grundbausteine des Universums und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte immer weiter erforscht und somit entscheidende Erkenntnisse in der Teilchenphysik gewonnen. Schon im 17. Jahrhundert haben sich Physiker wie Christian Huyghens und René Descartes mit dem Aufbau der Atome beschäftigt. 1897 wurde schließlich zum ersten Mal ein elementares Teilchen gefunden: das Elektron. Weitere Entdeckungen folgten zügig, wie zum Beispiel Ernest Rutherford 1919 die Existenz des Protons nachwies. Allerdings mussten die Physiker ab Mitte der 60'er Jahre feststellen, dass ihr bisheriges Verständnis von Materie nicht mehr ausreichend ist um die unglaubliche Menge der bisher entdeckten verschiedenen Teilchen zu erklären. Seit über 40 Jahren ist mit dem Quark-Modell schrittweise eine Theorie entstanden, die heute als „Standardmodell der Teilchenphysik“ bekannt ist. Durch experimentelle Bestätigungen der Teilchenbeschleuniger beschreibt sie die Grundbausteine der Materie und die fundamentalen Kräfte, über welche diese miteinander wechselwirken.

Dennoch bleiben viele Fragen offen. Woher stammt das Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie? Was geschah beim Urknall? Gibt es eine große vereinheitlichte Theorie, die die Quantenfeldtheorie und die allgemeine Relativitätstheorie vereinigen kann? Was ist der Ursprung der Masse? Mit dem leistungsstärksten Teilchenbeschleuniger der Welt erhoffen sich nun Wissenschaftler diesen Antworten einen gewaltigen Schritt näher zu kommen.

1 Brecht Bertolt, Leben des Galilei. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 1988. S.81

2 Goethe Johann Wolfgang, Faust: Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co, © 1986, 2000 V.382/383

2. Standardmodell

Das Standardmodell (bildlich zusammengefasst in Anlage 1) unterscheidet die Elementarteilchen in Materieteilchen und Kraftteilchen. Die mathematische Grundlage des Standardmodells ist die sogenannte Eichtheorie.

2.1 Materieteilchen

Materieteilchen, auch Fermionen genannt, bestehen aus sechs Leptonen und sechs Quarks, die jeweils in drei Familien auftreten.

2.1.1 Leptonen

Leptonen sind elementar, d.h. sie werden nicht aus anderen Teilchen zusammengesetzt. Das bekannteste Lepton ist das Elektron e^- . Die zwei weiteren geladenen Leptonen sind das Myon μ^- und das Tau τ^- . Zu diesen drei Leptonen gibt es jeweils auch ein zugehöriges ungeladenes Lepton. Diese werden Neutrinos genannt, wie z.B. das ungeladene Elektron: Elektron-Neutrino.

2.1.2 Quarks

Im Gegensatz zu den Leptonen lassen sich Quarks nicht experimentell einzeln beobachten, da sie immer in zweier Kombinationen (Mesonen) oder dreier Kombinationen (Baryonen) auftreten. Man nennt die Zusammensetzungen der Quarks allgemein Hadronen. Die sechs verschiedenen Quarks werden nach ihrem Identitätsmerkmal Flavor¹ unterschieden: als up-, down-, strange-, charm-, bottom- und top-Quark. Die Masse der Quarks nimmt in der genannten Reihenfolge zu. Zudem sind Quarks elektrisch geladen, tragen aber keine „ganzen“, sondern „Drittelladungen“, also entweder $\pm 2/3e$ oder $\pm 1/3e$, so dass die Summe der Quarksladungen einen ganzzahligen Wert ergibt, wie sich auch die Ladungen der drei Quarks bei einem Proton zu der Ladung $+1e$ ergänzen.

2.1.3 Generationen

Wie schon erwähnt, werden die Quarks und Leptonen jeweils in drei Generationen aufgeteilt. Heutzutage besteht unsere umgebende sichtbare Materie ausschließlich aus den Materieteilchen der ersten Familie. Denn die Materieteilchen der zweiten und dritten Familie, die im frühen Universum wichtig waren, sind aufgrund ihrer Instabilität im Laufe der Ausdehnung des Universums in Teilchen der ersten Familie zerfallen. Obwohl sich allgemein die Teilchen verschiedener Familien in ihren Eigenschaften ähnlich sind, unterscheiden sie sich dennoch erheblich in ihren Massen: Materieteilchen

¹ engl. Geschmack

der zweiten Generation sind schwerer als die der ersten, während die der dritten Familie am meisten Masse besitzen. Ungeklärt jedoch bleibt, warum genau drei Familien existieren, wenn doch zur Beschreibung unserer Alltagswelt eine ausreichen scheint.

2.1.4 Antiteilchen

Zu jedem Quark und Lepton gibt es ein korrespondierendes Antiteilchen, das die selben raumzeitlichen Eigenschaften wie Masse, Lebensdauer und Eigendrehimpuls seines entsprechenden Materieteilchens besitzt, allerdings sich in dessen Ladung genau entgegengesetzt verhält. Auch die Antiteilchen der Quarks und Leptonen werden zu den Materieteilchen gezählt.

2.2 Kraftteilchen

Alle Wechselwirkungen der Materieteilchen lassen sich durch vier verschiedene fundamentale Kräfte beschreiben: die Gravitation, den Elektromagnetismus, die starke und die schwache Kraft. Quantenmechanisch werden die Wechselwirkungen durch den Austausch von Kraftteilchen, auch Bosonen genannt, beschrieben. Dies ist vergleichbar mit zwei Personen, die in unserem Fall die Materieteilchen repräsentieren, welche auf einem eingefrorenen See sich gegenseitig abstoßen, indem sie einen Ball, welcher das Kraftteilchen darstellt, hin und her werfen. Folglich wirkt sich also der Austausch des Balls auf beide Personen aus. So ähnlich kann man sich nun auch das Boson vorstellen, welches Kräfte durch Wechselwirkungen auf die Materieteilchen überträgt. Dabei kann es sowohl zu anziehenden als auch zu abstoßenden Wirkungen kommen.

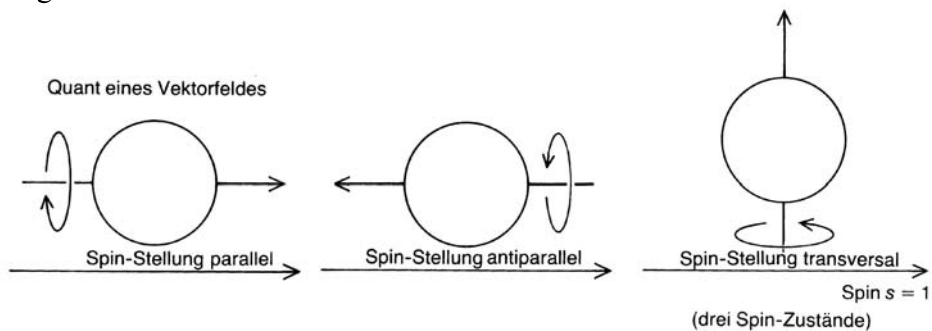
Das vermittelnde Teilchen der Gravitationskraft, das Graviton, wurde bisher noch nicht experimentell nachgewiesen. Da jedoch die Gravitation so schwach ist, kann sie für die Teilchenphysik vernachlässigt werden. Die elektromagnetische Wechselwirkung wirkt zwischen geladenen Teilchen und bindet somit z.B. die Elektronen an den Atomkern. Sie wird durch Photonen γ vermittelt, welche keine Ruhemasse besitzen. Für die Verbindungen der Quarks zu Hadronen ist die starke Wechselwirkung verantwortlich. Diese wird durch acht Gluonen g übertragen. Die drei intermediären Vektorbosonen, die sogenannten Weakonen W^+ , W^- und Z^0 ¹ sorgen für die schwache Wechselwirkung, welche radioaktive Zerfälle von Atomkernen durch Umwandlungen von Fermionen bewirkt. Allerdings ist bei jeder Umwandlung immer nur eines der zuvor genannten Vektorbosonen beteiligt. Hier ist zudem hervorzuheben, dass anders als die

¹ -, + und 0 stehen jeweils für die elektrische Ladung

Gluonen und das Photon, die Vektorbosonen der schwachen Wechselwirkung eine sehr hohe Masse besitzen.

2.3 Eigenschaft Spin

Wir haben nun die fundamentalen Unterschiede der Fermionen und Bosonen kennengelernt. Allerdings unterscheiden sich die Materieteilchen und die Kraftteilchen auch in einem weiteren bedeutenden Punkt voneinander: dem Spin. Der Spin, auch Eigen Drehimpuls genannt, ist eine wesentliche quantenmechanische Eigenschaft elementarer Teilchen. Man kann sich den Spin analog im Rahmen der klassischen Physik als eine Kugel vorstellen, die sich um eine durch den Kugelmittelpunkt gehende feste Achse dreht. Jedoch sind bei Fermionen nur zwei Spin Zustände möglich: der Spin kann parallel und antiparallel zur Ausbreitungsrichtung stehen, wohingegen bei den Bosonen drei möglich sind: der Spin kann parallel, antiparallel und transversal zur Ausbreitungsrichtung stehen.



Um dies zu unterscheiden ist der Wert des Spins der Materieteilchen immer halbzahlig, im Gegensatz zu den Bosonen, welchen ein ganzzahliger Spin zugewiesen wird. Des Weiteren werden die verschiedenen Drehrichtungen mit verschiedenen Vorzeichen dargestellt. Man spricht also von positivem oder negativem Spin.

2.4 Eichsymmetrie

Die historisch als Erste gelungene vereinheitlichte Quantenfeldtheorie ist die Verschmelzung von der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung zu der sogenannten elektroschwachen Theorie, welche auf Glashow, Salam und Weinberg zurück zu führen ist. Der eigentliche Durchbruch allerdings war die Erkenntnis, dass sich, trotz des unterschiedlichen Verhaltens bei geringen Energien, diese elektroschwache Theorie bei extrem hohen Energien ab 10^{15} GeV sogar mit der starken Kraft vereinen lässt. Dieser großen vereinheitlichten Theorie (auch bekannt unter GUT

1 Hooft Gerhard 't, Symmetrien in der Physik der Elementarteilchen. In: Spektrum der Wissenschaft, 08/1980, S.97

=Grand Unification Theory) von elektromagnetischer, schwacher und starker Wechselwirkung liegt eine so genannte Eichsymmetrie zugrunde. Diese Eichsymmetrie oder auch Eichinvarianz weist auf eine Feldtheorie hin, bei welcher sich die Feldgleichungen nicht ändern, wenn bestimmte Eigenschaften der Felder unabhängig voneinander an jedem Punkt in Raum und Zeit geändert werden. Das bedeutet also eine Größe kann unabhängig von Raum und Zeit durch Transformationen geändert werden. Die Idee der Eichsymmetrie kommt auch schon bei der elektromagnetischen Feldtheorie von Maxwell vor. Denn die Eichtheorie „[...] stellt gewissermaßen die Verallgemeinerung der Eigenheit dar, dass - wie zum Beispiel in der Elektrizität - nur Potentialunterschiede von Bedeutung sind, nicht aber der Wert des Potentials selbst.“¹ Würde man also eine globale² Transformation anwenden, indem man das elektrische Potential symmetrisch an allen Punkten des Raumes um den gleichen Betrag erhöht, ändern sich dennoch die für das Feld charakteristischen Messwerte nicht. Das elektrische Feld ist somit invariant gegenüber Additionen und Subtraktionen eines beliebigen Potentials. Das bedeutet für uns also, dass der Nullpunkt des Potentials willkürlich eingestellt oder auch geeicht werden kann. Bei elektromagnetischen Feldern hingegen darf man nun auch an jedem Punkt des Raumes den Wert des elektrischen Potentials unabhängig von den Potentialen der anderen Raumpunkte wählen. Und genau dieses Grundprinzip wird bei der lokalen³ Eichtheorie verfolgt.

Zentraler Bestandteil der Eichtheorie ist außerdem eine mathematische Funktion, die die Wechselwirkungen der verschiedenen Teilchen beschreibt. Wenn man nun diese sogenannte Lagrange-Funktion mit einem masselosen Eichboson verrechnet, dann ist Lagrangedichte invariant unter der lokalen Eichtransformation. Somit funktioniert also die Eichtheorie für masselose Kraftteilchen. Spannend wird es allerdings, sobald man nun einen Massenterm zu dieser Funktion addiert, denn dadurch geht die Eichsymmetrie verloren! D.h. die Eichtheorie, das grundlegende Konzept des Standardmodells, wird durch die Eigenschaft Masse verletzt.

1 Weinberg Steven, Eine Theorie für alles? In: Spektrum der Wissenschaft, Spezial 1/2000 Forschung im 21. Jahrhundert S.19

2 Die gleiche Transformation wird überall bei allen Raum-Zeitpunkten durchgeführt

3 Verschiedene Transformationen dürfen an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt anders gewählt werden. D.h. Im Gegensatz zur globalen Symmetrie muss ein Gesetz auch dann invariant sein, wenn für unterschiedliche Orte verschiedene Transformationen durchgeführt werden.

3. Begriff Masse

Was jedoch ist eigentlich Masse? Bisher wurde angenommen, dass Masse eine Eigenschaft des Körpers ist. Zunächst wurde zwischen „schwerer“ und „träger“ Masse unterschieden. Schwere Massen ziehen sich gegenseitig an, so wie z.B. die Menschen von der schweren Masse der Erde angezogen werden. Die träge Masse hingegen ist durch Newtons Formel $F=ma$ definiert, wobei F für die Kraft, m für die Masse und a für die Beschleunigung steht. Durch diese Gleichung ist die träge Masse durch die aufzuwendende Kraft definiert, die nötig ist, um die Masse in Bewegung zu setzen oder zu stoppen. Mit Albert Einstein wurde dann jedoch gezeigt, dass die schwere Masse und die träge Masse eines Körpers identisch sind. Außerdem erklärte Einsteins Relativitätstheorie Masse zudem als Form von Energie: $E_0=m_0c^2$. Da c , die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, eine Konstante ist, folgt daraus, dass die Energie E direkt proportional zur Masse m sein muss. Wie allerdings entsteht diese Energie und die daraus auch direkt zusammenhängende Masse?

Wir wissen inzwischen, dass zusammengesetzte Teilchen wie z.B. Protonen und Neutronen ihre Masse durch verschiedene Faktoren erhalten. Zum einen setzt sich deren Masse aus den Ruhemassen ihrer Bestandteile, den Quarks, zusammen, zum anderen entsteht weitere Masse durch die kinetische Energie sowie potentieller Energie ihrer Wechselwirkungen. Was allerdings ist der Ursprung der Ruhemassen der Elementarteilchen? Und wie lassen sich die extrem großen Massen der W- und Z-Bosonen mathematisch erklären? Denn wie zuvor erwähnt, bringt die Berücksichtigung ihrer Masse in den Bewegungsgleichungen ein massives Problem mit sich.

4. Masse als Wechselwirkung

4.1 Higgs-Mechanismus

Um die mathematische Unvereinbarkeit der Massen mit der Eichtheorie zu umgehen, werden vorerst alle Teilchen als masselos angenommen. Dadurch ist die Eichsymmetrie gerettet und alle Kräfte können zwischen den Teilchen korrekt und widerspruchsfrei beschrieben werden. Um nun die experimentell nachgewiesene Masse sowohl der Materie- als auch der Kraftteilchen zu erklären, wird im gesamten Raum ein konstantes Higgs-Feld postuliert, welches mit den Teilchen ständig koppelt und ihnen somit Masse verleiht. D.h. unser altes Verständnis von Masse als eine Eigenschaft der Teilchen wird

nun ersetzt durch die Vorstellung der Masse als eine Folge permanenter Wechselwirkungen mit einem allgegenwärtigem Hintergrundfeld. Allgemein sagt man, die Teilchen erhalten über den Higgs-Mechanismus, benannt nach Peter Higgs, ihre Masse. Der Higgs-Mechanismus funktioniert nach dem Prinzip der spontanen Symmetriebrechung. Ein anschauliches Beispiel einer Symmetriebrechung ist die Übergangsphase von flüssigem Wasser zu Eis. Das Wasser besitzt eine Kugelsymmetrie, die gegenüber allen Drehungen invariant ist. Selbst wenn die Perspektive an unterschiedlichen Punkten der Raumzeit jeweils eine andere ist, wird die Kugel von allen Seiten gleich aussehen. Durch die Bildung von Eiskristallen, die eine starre, sechsfache Struktur besitzen, wird die Kugelsymmetrie spontan gebrochen.

Um den Higgs-Mechanismus besser verstehen zu können, kann man sich diesen auch als eine Art Reibung vorstellen. Für das Durchdringen eines Objektes zum Beispiel durch Wasser muss eine größere Kraft aufgebracht werden als im Vakuum. Laut Newtons Definition träger Masse, muss somit das Objekt eine größere Masse erhalten. Ein weiteres, sehr bekanntes, anschauliches Beispiel für den Higgs-Mechanismus, stammt von David Miller. Dieser vergleicht das Higgs-Feld mit einem mit Menschen gleichmäßig gefüllten Raum. Sobald nun der Ex-Premierminister eintritt, wird dieser von den Menschen in seiner Umgebung haufenartig umzingelt. Dadurch wird die Symmetrie des Raumes gebrochen und die eingetretene Person kann sich dadurch nicht mehr so schnell durch den Raum bewegen. Sie erhält also träge Masse. Außerdem wird je nach Beliebtheit der Person, diese mehr oder weniger von Leuten umringt. So ähnlich funktioniert das auch beim Higgs-Mechanismus. Denn je nach Teilchen koppelt das Higgs-Feld unterschiedlich stark an diese. Je stärker die Kopplung des Higgs-Felds an das Teilchen ist, desto größer ist auch die erzeugte Masse. Aufgrund dieser Proportionalität lassen sich die verschiedenen Massen der Kraftteilchen erklären.

4.2 Higgs-Feld

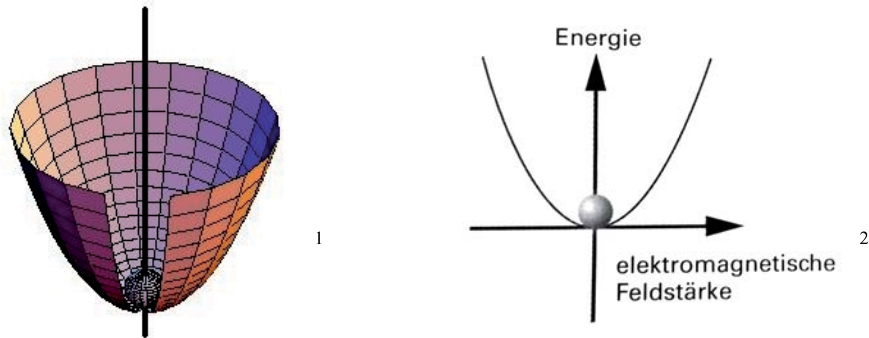
4.2.1 Skalarfeld

Was aber genau ist jetzt ein Higgs-Feld? Das Higgs-Feld muss ein skalares Feld sein, damit die Masse der Teilchen nicht von deren Ausrichtung bezüglich des Feldes abhängt. Das heißt, durch das Skalarfeld haben Teilchen immer die gleichen Massen, unabhängig von ihrem Ort und ihrer Bewegungsrichtung. Denn bei einem Skalarfeld ist

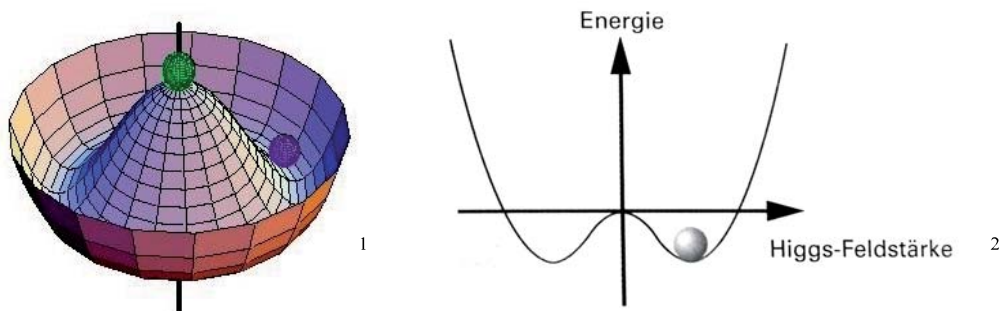
jedem Punkt eine einzige Größe oder Zahl zugeordnet, im Gegensatz zu dem Vektorfeld, bei welchem jeder Punkt durch die Größe, die Länge und die Richtung des Pfeils definiert ist. Extrem stark vereinfacht würde sich bei einem vektoriellen Higgs-Feld die Masse einer Person ändern, wenn sie sich an einem bestimmten Ort dreht.

4.2.2 Potential

Außerdem wird angenommen, dass das Higgs-Feld überall, und vor allem überall gleich wirkt. Das heißt es füllt den gesamten Raum aus und verschwindet somit auch im Vakuum nicht. Gewöhnlich wird unter dem Begriff Vakuum ein „leerer Raum“ verstanden. Allerdings ist das Vakuum genau genommen der Zustand, in welchem alle Felder die kleinst mögliche Energie haben. Bei den meisten Feldern ist der niedrigste Energiezustand, derjenige bei dem das Feld den Wert Null annimmt. Folgende Abbildungen zeigen das Potential der bisher kennengelernten Felder, wobei die Kugel jeweils das Feld symbolisiert:



Beim Higgs-Feld hingegen ist seine Energie minimal, wenn es überall gleich ist und einen Wert ungleich Null im Vakuum besitzt. Diesen von Null verschiedenen Vakuumerwartungswert hat das Higgs-Feld nach einiger Abkühlung nach dem Urknall durch einen Effekt der spontanen Symmetriebrechung erhalten. Folgende Abbildung zeigt das Potential des Higgs-Felds, welches oft auch als Mexikanerhut- oder Sektflaschenpotential bezeichnet wird:



1 [www.hephy.at hephy theorie group, supersymmetrie](http://www.hephy.at/hephy_theorie_group_supersymmetrie) <http://www.hephy.oeaw.ac.at/susy/projekte.htm>
 2 Kane Gordon, Das Geheimnis der Masse. In: Spektrum der Wissenschaft, 02/2006 S.39

Die violette Kugel sowie auch die Kugel der rechten Abbildung liegen in einem minimalen Energiezustand vor. Der Wert Null des Vakuums liegt in der Mitte des Hügels und ist somit instabil gegenüber Störungen, so dass das System bzw. die Kugel immer wieder in den niedrigsten Energiezustand bzw. in den kreisförmigen Graben zurück fallen wird. Dies zeigt, dass das Universum in seinem Grundzustand eben nicht „leer“ ist, sondern von einem konstanten überall wirkendem Higgs-Feld erfüllt ist.

Was aber genau hat damit die zuvor erwähnte spontane Symmetriebrechung zu tun? Solange die Kugel in der Mitte des Hügels liegt, herrscht ein absolut symmetrischer Zustand. Rollt die Kugel allerdings hinab und befindet sich somit im energetischen Grundzustand, hat sie sich für eine bestimmte Richtung entschieden bzw. das System hat sich auf einen Wert festgelegt und dadurch die Symmetrie gebrochen.

4.3 Das Higgs-Boson

4.3.1 Eigenschaften

Wie bei jedem physikalischen Feld wird die Wirkung des Higgs-Felds durch ein Austauschboson, dem sogenannten Higgs-Boson, vermittelt, welches entsteht, sobald das Higgs-Feld energetisch angeregt wird. Allerdings muss man das Higgsteilchen von den zuvor beschriebenen Kraftteilchen unterscheiden, da das Higgsteilchen ja ursprünglich nur zu dem Zweck eingeführt wurde, um die mathematische Konsistenz des Standardmodells zu verbessern. Während die bisher kennengelernten Bosonen eine Kraft zur Folge haben, sorgen die Higgs-Bosonen durch Wechselwirkungen für die Masse der Materie- und Kraftteilchen.

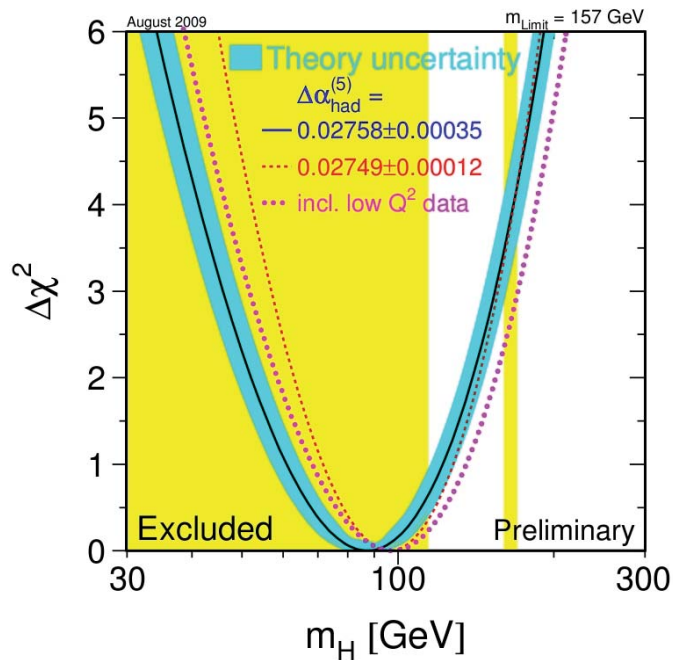
Da das Higgs-Feld ein Skalarfeld ist, folgt daraus dass sein Feldquant, das Higgs-Boson, keinen Eigendrehimpuls besitzt. D.h. das Higgsteilchen ist spinlos und besitzt somit Spin 0 - all seine Orientierungen sind also gleichwertig. Zudem ist das Higgs-Boson elektrisch ungeladen.

Klingt also alles nach einer präzise überlegten und funktionierenden Theorie. Die - von mir bisher noch nicht erwähnte - größte Schwierigkeit liegt nun allerdings darin, die bisher eben nur theoretisch vorhergesagte Theorie experimentell nachzuweisen. Denn seit der Higgs-Mechanismus 1964 postuliert wurde, gab es noch keine experimentellen Befunde zur Bestätigung dieser Theorie. Es würde genügen, nur ein einziges Higgsteilchen zu finden. Leichter gesagt, als getan. Denn, obwohl der Higgs-Mechanismus

die Massen der anderen Teilchen begründen kann, kann dieser nicht die Massen der Materieteilchen, und schon gar nicht die der Higgsteilchen selbst, vorhersagen.

4.3.2 Masse

Aufgrund von Beschleunigern wie dem Tevatron-Collider des Fermi National Accelerator Laboratory in Illinois oder auch dem LEP (Large Electron-Positron Collider) am europäischen Kernforschungszentrum CERN kann allerdings ein gewisser Messbereich ausgeschlossen werden. Man kann davon ausgehen, dass die Masse des Higgs-Bosons größer als $114,4 \text{ GeV}/c^2$ sein müsste. Außerdem konnte der Beschleuniger Tevatron die Region zwischen $160\text{-}170 \text{ GeV}/c^2$ ausschließen. Diese ausgeschlossenen Massen werden in dem folgenden Diagramm gelb markiert dargestellt:



Zudem stellt die Parabel ähnliche Linie die theoretisch ausgerechnete Wahrscheinlichkeit dar mit welcher die Massen der Higgsteilchen auftreten. Bei der Beachtung der bisherigen experimentellen Befunde vom LEP erhält man allerdings mit 95% Wahrscheinlichkeit eine obere Massengrenze von ungefähr $186 \text{ GeV}/c^2$ statt der ursprünglichen theoretischen Grenze von $157 \text{ GeV}/c^2$.

1 www.cern.ch LEP/TEV EW WG Plots for Summer 2009
<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/plots/summer2009/>

4.3.3 Entstehung und Zerfall

Eine weitere Hürde für die Wissenschaftler ist die Kurzlebigkeit der Higgsteilchen, denn diese zerfallen schon nach ungefähr 10^{-22} Sekunden in neue Teilchen. Das bedeutet, man könnte Higgsteilchen ausschließlich anhand deren Zerfallsprodukten beobachten. Leichte Higgs-Bosonen (unter $140 \text{ GeV}/c^2$) könnten beispielsweise in hochenergetische Photonen oder sehr viel wahrscheinlicher, allerdings auch in die schwerer nachweisbaren bottom-Quarks zerfallen. Schwere Higgsteilchen (über $140 \text{ GeV}/c^2$) hingegen zerfallen unter anderem in W^+W^- Bosonen, zwei Z^0 -Teilchen oder auch in zwei top-Quarks. Bei dem Teilchenbeschleuniger LEP waren aufgrund seiner maximalen Energieleistung die schwerst möglichen Zerfallsteilchen zwei b-Quarks (das zweit schwerste Quark). Lange wurde bei dem LEP nach Kollisionen von einem Elektron und seinem Antiteilchen, dem Positron gesucht. Das dadurch entstehende Higgsteilchen könnte nun in zwei b-Quarks zerfallen. Gleichzeitig kann durch die Kollision auch ein Z^0 -Boson entstehen, welches in zwei Neutrinos zerfallen könnte. Vorzugsweise hat man also unter sehr vielen möglichen Kollisionen folgende gesucht:

$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 + H \rightarrow Z^0 + b + b$$

4.3.4 Suche beim LHC

Im Gegensatz zu allen vorherigen Beschleunigern kann nun der LHC den gesamten theoretischen möglichen Massenbereich nach dem Higgsteilchen durchsuchen. Bei einer Energie von 7 TeV pro Teilchen werden beim LHC Protonen zur Kollision gebracht. Dabei kann nun das Higgsteilchen beispielsweise bei einer Kollision zweier Protonen erzeugt werden, welche in zwei Z^0 -Teilchen zerfallen, wobei jedes der Z^0 -Bosonen in zwei weitere Myonen zerfallen könnte. Im Endeffekt würden also als Endprodukte vier energiereiche Myonen vorliegen. Auch die Higgszerfälle, verursacht durch die top-Quarks, könnten nun mit dem LHC beobachtet werden.

4.4 Schwächen

Der Nachweis des Higgsteilchens ist insbesondere Aufgabe der Experimente ATLAS und CMS. Doch sogar falls man das Higgs-Boson nachweisen könnte, blieben immer noch einige Lücken der Higgs-Theorie. Beispielsweise können bislang die unterschiedlichen Massen nur durch die unterschiedlichen Kopplungen des Higgs-Felds an die Masse erhaltenden Teilchen erklärt werden. Allerdings versteht man noch nicht warum das Higgs-Feld überhaupt unterschiedlich stark an die Teilchen koppeln sollte.

Auch die Erzeugung der Massen der Higgsteilchen selbst ist bisher unklar. Man vermutet allerdings, dass diese ebenfalls durch einen Effekt der Selbstwechselwirkung mit dem Higgs-Feld entstehen würden. In unserer vorherigen Analogie von David Miller, kann man sich die Higgsteilchen nun als eine Art Gerücht vorstellen, das aufgrund der eintretenden Berühmtheit, den Raum ebenfalls durchquert. Dadurch sammeln sich ebenfalls Zuhörer in einer „Traube“ und verleihen dem Gerücht so eine flüchtige Masse.

Eine weitere Schwäche des Higgs-Mechanismus entsteht dadurch, dass das allgegenwärtige Higgs-Feld zur Energiedichte des Universums beitragen würde. Denn das Graviton koppelt an alles was Masse hat - und somit laut Einstein auch an alles was Energie besitzt. Da das Higgs-Feld den ganzen Kosmos ausfüllt, würde die Kopplung des Gravitons an das Energiefeld den gleichen Effekt wie Einsteins kosmologische Konstante¹ haben. Demnach wäre das gesamte Universum extrem stark gekrümmt – bis zu einer Größe eines Fussballs! Um dies erklären zu können, geht man davon aus, dass das „wahre“ Vakuum (ohne dem Higgs-Feld) selbst eine hohe kosmologische Konstante enthält. Diese soll die selbe Größe der kosmologischen Konstante des Higgs-Felds besitzen, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, so dass das Higgs-Feld gerade annähernd kompensiert wird.

4.5 Erweiterungen

Erweiterungen des Standardmodells prognostizieren nicht nur ein, sondern mehrere Higgs-Bosonen. Beispielsweise die Supersymmetrie, eine Theorie, die versucht alle Grundkräfte der Natur, also auch die Gravitation, zu vereinheitlichen, fordert ein positiv geladenes Higgsteilchen H^+ , ein negativ geladenes Higgsteilchen H^- und drei neutrale H^0 . Zudem verlangt die Supersymmetrie, kurz auch SUSY, mindestens zwei verschiedene Higgs-Felder. Dabei würde ein Higgs-Feld die Masse der „Standardteilchen“ verursachen, während das zweite Higgs-Feld die für die Supersymmetrie notwendigen Superpartner mit Masse versehen würde. Denn laut SUSY gehört jedes bekannte Teilchen zu einem symmetrischen Teilchenpaar, bei welchem sich die Partner nur durch Spin und Masse unterscheiden würden.

¹ Beschreibung der Gravitationskraft als geometrische Krümmung der Raumzeit

5. Ausblick

Wenn die Supersymmetrie bestätigt werden könnte und das Higgsteilchen nachgewiesen werden würde, wäre das mehr als nur ein „Erfolg“ in der Teilchenphysik. Wie auch Daniel Deregri, ein Mitarbeiter beim LHC, sagte: „Das Higgs ist unser Heiliger Gral. Es fehlt als letztes Partikel im Standardmodell. Finden wir es, ist das Modell vollendet, das wäre die Krönung unserer Arbeit.“¹ Dennoch wären noch längst nicht alle Fragen geklärt. Beispielsweise kann man auch mit der Supersymmetrie nicht erklären, warum genau drei Familien der Materieteilchen existieren. Und aus was besteht die mysteriöse Dunkle Materie, aus welcher 25% unseres Universums besteht? Wie kann eigentlich unsere heutige Umgebung aus Materie bestehen? Denn theoretisch hätten sich Materie und Antimaterie beim Urknall gegenseitig völlig vernichten müssen. Um dies zu untersuchen, werden beim LHC z.B. bei Pb-Pb-Kollisionen Energiedichten erreicht, wie sie rund 10^{-6} Sekunden nach dem Urknall herrschten. Trotz dieser noch unbeantworteten Fragen wäre die Bestätigung des Higgs-Felds ein gewaltiger Durchbruch für die Teilchenphysik. Das heutige Weltbild der Physik hätte seine eindrucksvoll Bestätigung erfahren. Was allerdings würde es für unsere Teilchenphysik bedeuten, wenn das Higgsteilchen nicht gefunden wird? Was für den einen als spannend erscheinen mag, bedeutet für andere den Zusammenbruch der Grundlagen des Standardmodells. Tatsächlich wäre es wahrscheinlich eine Mischung aus beidem. Denn auch wenn der Higgs-Mechanismus die momentan beste Theorie ist, um die fundamentalen Probleme des Standardmodells zu lösen, schließt dieser andere Theorien nicht aus. Jedoch existiert für neue Lösungsansätze nur ein ganz bestimmter Spielraum, denn bestimmte Teile des Standardmodells sind einfach so gut bestätigt, dass es schwer vorstellbar ist, diese als komplett falsch zu deklarieren. Es wäre also eine enorme Herausforderung eine neue, mindestens genauso gut funktionierende Theorie aufzustellen.

¹ www.focus.de Odenwald Michael, Das Teilchen Gottes.
http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/physik-das-teilchen-gottes_aid_185591.html

Literaturverzeichnis

Dosch Hans Günter, Einführung. In: Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung; Teilchen, Felder und Symmetrien, Heidelberg: Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, 1986, S.1-5

Ne'eman Yuval und Kirsh Yoram, Die Teilchenjäger. Berlin: Springer Verlag, 1995

www.cern.ch (16.07.2009) präsentiert bei „The 2009 Europhysics Conference on High Energy Physics" Krakow, Low mass Higgs and Higgs properties at the LHC
<http://cdsweb.cern.ch/record/1190799/files/ATL-PHYS-SLIDE-2009-189.pdf>

Bundesministerium für Bildung und Forschung, Weltmaschine. Bonn, Berlin 2008

www.weltderphysik.de (06.01.2009) Desch Klaus, die Suche nach dem Higgs-Boson und dem Ursprung der Masse.
<http://www.weltderphysik.de/de/6894.php>

Veltman Martinus J.G., Das Higgs-Boson. In: Spektrum der Wissenschaft, 01/1987, S.52-59

CD: Hands on particles physics European Particle Physics Outreach Group EPPOG.
 Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
[/exercises/bonn1/de/teilchenphysik.htm](http://exercises/bonn1/de/teilchenphysik.htm)

www.physicsworld.com (4.10.2006) Parker Andy, Expedition to inner space.
<http://physicsworld.com/cws/article/print/26016>

Hooft Gerhard 't, Symmetrien in der Physik der Elementarteilchen. In: Spektrum der Wissenschaft, 08/1980, S.92-110

Haber Howard E und Kane Gordon L., Ist die Natur supersymmetrisch? In: Spektrum der Wissenschaft, 08/1986

Amsler Claude, Kern- und Teilchenphysik. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2007

Kane Gordon, Das Geheimnis der Masse. In: Spektrum der Wissenschaft, 02/2006,
S.36-43

Ingold Gert-Ludwig und Lambrecht Astrid, Die 101 wichtigsten Fragen. München:
Verlag C.H. Beck oHG, 2008

www.cern.ch LEP/TEV EW WG Plots for Summer 2009
<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>

www.weltmaschine.de Bundesministerium für Bildung und Forschung, Das
Standardmodell der Teilchenphysik.
http://www.weltmaschine.de/physik/standardmodell_der_teilchenphysik/

www.focus.de (05.09.2008) Odenwald Michael, Kann der LHC zur Zeitmaschine
werden?
http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/odenwalds_universum/frage-von-wigbert-eppe-kann-der-lhc-zur-zeitmaschine-werden_aid_325107.html

Cline David B., Suche nach exotischen Teilchen. In: Spektrum der Wissenschaft,
12/1994, S.38-47

Georgi Howard, Vereinheitlichung der Kräfte zwischen den Elementarteilchen. In:
Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung; Teilchen, Felder und
Symmetrien, Heidelberg: Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft,
1986, S.134-152

Rauchhaupt Ulf, Higgs-Feld: Die Quelle der Langsamkeit. Frankfurter Allgemeine
Sonntagszeitung, 03.04.2005, Nr. 31, S.71

Weinberg Steven, Eine Theorie für alles? In: Spektrum der Wissenschaft, Spezial
1/2000 Forschung im 21. Jahrhundert, S.12-19

Dosch Hans Günter, Jenseits der Nanowelt. Heidelberg: Springer Verlag Berlin, 2005

Fritzsch Harald, Sie irren, Einstein. München: Piper Verlag GmbH, 2008

www.drillingsraum.de Interview mit CERN-Physiker Dr. Matthias Schott, Teil 2: Über das HIGGS-Teilchen und den HIGGS-Mechanismus.

http://www.drillingsraum.de/cern/cern_higgs.html

www.spektrum.de (12.09.2008) Quigg Chris, Teilchenphysik vor dem Umbruch.

http://www.spektrum.de/artikel/967468&_z=798888

www.weltderphysik.de (26.09.2002) Rathje Dirk, Zutaten für ein Universum.

<http://www.weltderphysik.de/de/925.php>

www.hep.ucl.ac.uk Miller David J., A quasi-political Explanation of the Higgs Boson; for Mr Waldegrave, UK Science Minister 1993.

<http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html>

Treichel Michael, Teilchenphysik und Kosmologie. Heidelberg: Springer Verlag, 2000

Grotelüsch Frank, Der Klang der Superstrings. München: Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, 1999.

www.wissenschaft-online.de (07.10.2008) Pollman Maïke, Gebrochene Symmetrie.

<http://www.wissenschaft-online.de/artikel/969643>

www.focus.de (30.09.2000) Odenwald Michael, Das Teilchen Gottes.

<http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/physik-das-teilchen>

www.solstice.de Geschichte der Teilchenphysik

http://www.solstice.de/grundl_d_tph/sm_gesch/sm_gesch_00.html

Wagner Robert, Erzeugung und Nachweis von Higgs-Bosonen - a short Higgs hunter's guide. TU München, 06.07.2000

www.hephy.at Hefy theorie group, supersymmetrie.

<http://www.hephy.oeaw.ac.at/susy/projekte.htm>

www.physicsworld.com (10.07.2004) Rodgers Peter, Peter Higgs: the man behind the

boson. <http://physicsworld.com/cws/article/print/19750>

Sibold K., Theorie der Elementarteilchen. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: Teubner, 2001

Goethe Johann Wolfgang, Faust. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co, 1986

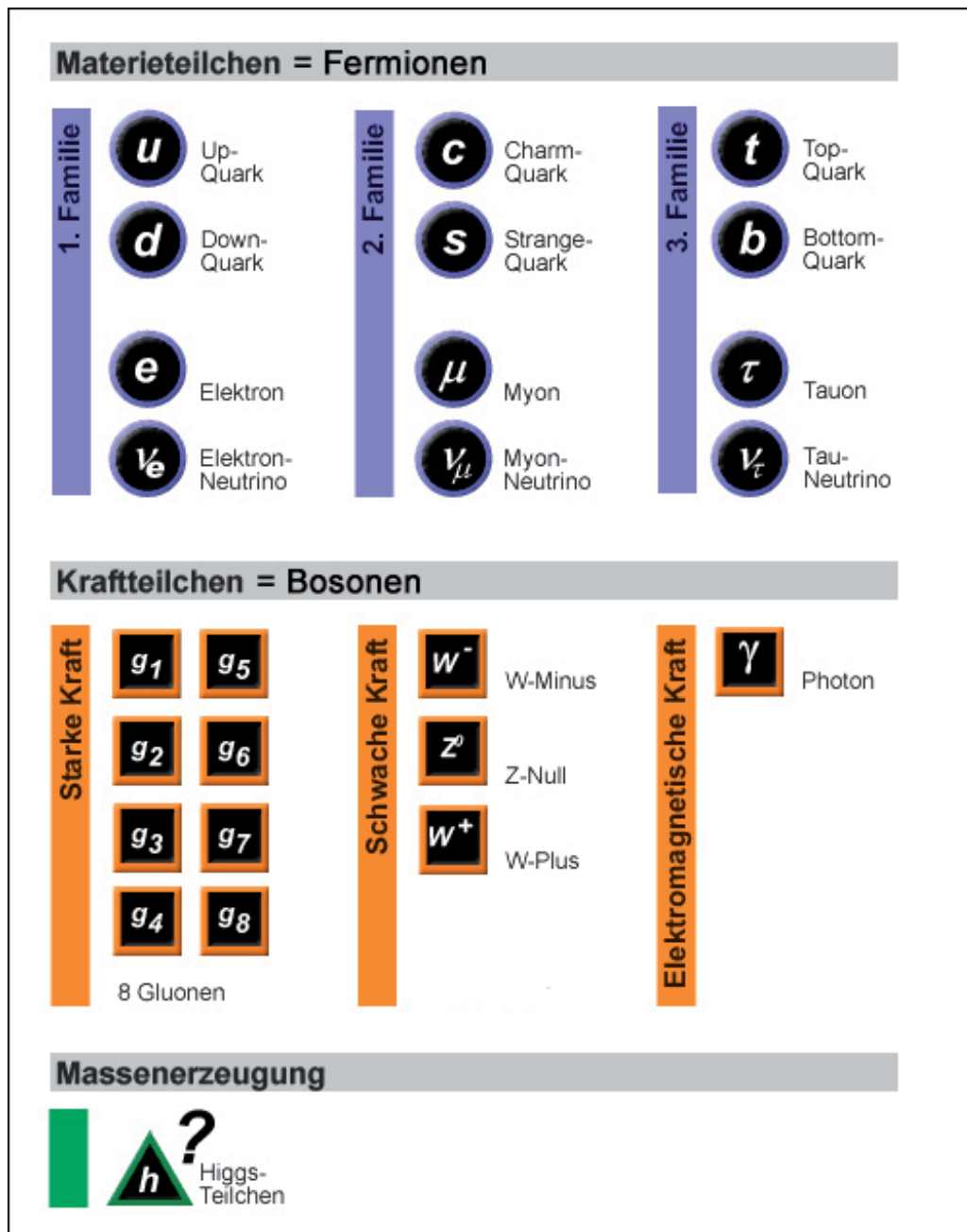
Brecht Bertolt, Leben des Galilei. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 1988.

Abbildung des Deckblatts: www.mppmu.mpg.de Research at the Max-Planck-Institut

für Physik <http://www.mppmu.mpg.de/english/Research.html>

Anhang:

Anlage 1:



1 www.weltderphysik.de (06.01.2009) Desch Klaus, die Suche nach dem Higgs-Boson und dem Ursprung der Masse. <http://www.weltderphysik.de/de/6894.php>

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den
Ort Datum Unterschrift