

Geschwister-Scholl-Gymnasium

Elmar Peise

Facharbeit

Thema: Aufbau der Materie vom Atom
bis zum Standardmodell
der Elementarteilchenphysik

Fach: Physik

Abgabe: 22.02.08

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Atome	3
2.1	Antikes Griechenland	3
2.2	JOHN DALTON	3
3	Elektronen, Protonen und Neutronen	4
3.1	Radioaktivität	4
3.2	Elektronenstrahlen	5
3.3	RUTHERFORDSches Atommodell	5
3.4	Nukleonen	5
3.5	Übersicht	6
4	Der Teilchenzoo	6
5	Das Standardmodell	7
5.1	Quarks	8
5.2	Leptonen	9
5.3	Zusammensetzung der Hadronen	10
5.4	Kräfte und Austauschteilchen	10
5.4.1	Die starke Wechselwirkung: Gluonen	11
5.4.2	Die schwache Wechselwirkung	11
5.4.3	Elektromagnetismus, Photonen und das Licht	12
5.4.4	Gravitation	13
5.5	Noch einmal Masse: Higgs-Bosonen	13
6	Ausblick	14

1 Einleitung

Woraus wir selber und alles um uns herum besteht, ist eine Frage, welche die Menschen beschäftigt. „Was geschieht, wenn ich ein Objekt immer wieder in der Mitte teile? Gibt es ein Ende und was bleibt dann übrig?“ Die Forschung beschäftigt sich seit langem mit diesem Thema. Es gab immer wieder neue Entdeckungen, welche Fragen beantworteten, jedoch auch neue aufwarfen. Ob jedoch jemals eine endgültige Antwort gefunden wird, ist ungewiss.

Auch mich interessieren diese grundlegenden Fragen und aus Interesse an aktuellen Forschungen habe ich beschlossen, diese Arbeit über das Thema anzufertigen.

Sie gibt einen Einblick über die Entdeckungen, welche Aufschluss über den Aufbau der Materie geben. Sie geht genauer auf das Standardmodell der Elementarteilchenphysik ein, das den aktuellen Forschungsstand beschreibt und inzwischen als gültig akzeptiert wird.

Die einzelnen Modelle werden hierbei erläutert. Es wird jedoch nicht auf die mathematischen Zusammenhänge eingegangen, da dies den Umfang der Arbeit sprengen würde.

2 Atome

Am Anfang steht die Idee, dass jegliche Materie aus Elementarteilchen besteht: Teilchen, welche sich nicht weiter unterteilen lassen.

2.1 Antikes Griechenland

Erste Aufzeichnungen, welche unseren Modellen ähneln, entspringen dem antiken Griechenland. Hier wurde gelehrt, dass sämtliche Materie aus den vier Elementen Feuer, Erde, Luft und Wasser besteht.

Der griechische Philosoph DEMOKRIT lebte um 460 v. Chr. in Abdera. Er und sein Lehrer LEUKIPP fertigten als erste konkrete Aufzeichnungen zu von den üblichen Vorstellungen abweichenden Theorien an. Ihren Überlegungen zufolge konnte man Materie nicht unendlich oft teilen. Es musste irgendeine Grenze geben, ein *átomos* (griech. unteilbar), ein Teilchen, welches sich nicht weiter spalten lässt. DEMOKRIT ging von unendlich vielen solcher festen „Elementarteilchen“ mit verschiedenen Eigenschaften aus. Diese verknüpften sich bei Annäherung miteinander und bildeten je nach Typ verschiedene Elemente wie Wasser oder Luft. Auch der menschlichen Seele sagte er eine solche Struktur zu.

Seine eher religiös ausgerichteten Mitmenschen konnten dieser philosophischen Vorstellung jedoch nichts abgewinnen und DEMOKRITs Ideen blieben lange unbeachtet [3].

Aus dem altgriechischen Wort „*átomos*“ stammt der heutige Begriff *Atom*.

2.2 JOHN DALTON

Rund 2000 Jahre nach den ersten Überlegungen DEMOKRITs griff JOHN DALTON, ein englischer Naturforscher, um 1800 die Atomtheorie wieder auf. Er beobachtete, dass bei chemischen Reaktionen Mengenverhältnisse konstant sind. Hieraus schloss er, dass immer eine bestimmte Anzahl von Atomen in festen Verhältnis miteinander reagieren. In seinem Modell haben alle Atome eines Elementes die gleiche Masse und Größe. Wenn diese Atome sich in chemischen Reaktionen miteinander verbinden, so bilden sie

verschiedene Moleküle. Der Aufbau dieser Moleküle bestimmt die Eigenschaften der geformten Materie [4].

Mit DALTONS Theorie ließen sich neben chemischen Reaktionen Aggregatzustände und die Gasgesetze BOLTZMANNs erläutern. Für elektrische Ladungen und Leitfähigkeiten konnten jedoch keine schlüssigen Erklärungen gefunden werden.

3 Elektronen, Protonen und Neutronen

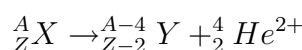
Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts traten in Experimenten Effekte auf, die sich nicht mit der DALTONSchen Atomtheorie erklären ließen.

3.1 Radioaktivität

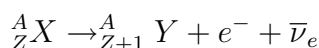
Bei dem Versuch, Röntgenstrahlen durch Fluoreszenz zu erklären, beobachtete der französische Physiker ANTOINE HENRI BECQUEREL 1896, dass Uran eine Strahlung aussendet, welche eine lichtdicht verpackte Fotoplatte schwärzt. Diese Strahlen können nicht durch lichtundurchlässige Materialien geblockt werden und sind in der Lage, Luft zu ionisieren. Bei allen radioaktiven Strahlen handelt es sich um die Emission von verschiedenen Teilchen.

Radioaktive Strahlung lässt sich in drei Komponenten unterteilen [4]:

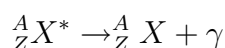
- **α -Strahlen** werden schon von einem dünnen Papierstück absorbiert. In einem elektrischen Feld werden die emittierten Teilchen zum negativen Pol hin abgelenkt, weshalb sie positiv geladen sein müssen. Wie sich später herausstellte, handelt es sich bei dem produzierten α -Teilchen um einen Heliumkern. Der Zerfall geschieht folgendermaßen¹:



- **β -Strahlen** werden von einem wenige Millimeter dicken Metallblech absorbiert. Die emittierten Teilchen werden in einem elektrischen Feld zum positiven Pol hin abgelenkt, wodurch sie negativ geladen sein müssen. Aus dem Energieerhaltungsgesetz folgte, dass noch ein weiteres Teilchen produziert werden muss. Dies ist ein Antineutrino, welches im Abschnitt 5.2 dieser Arbeit behandelt wird:



- **γ -Strahlen** lassen sich nur schwer durch viel Materie (z.B. Blei) schwächen, jedoch nicht vollkommen absorbieren. Sie lassen sich auch nicht von elektromagnetischen Feldern beeinflussen. Bei γ -Strahlung handelt es sich um hochenergetische elektromagnetische Strahlung. Das abgegebene Teilchen ist ein Photon². Beim γ -Zerfall gibt der Atomkern Energie ab, wobei das Element nicht umgewandelt wird:



Auf die hier neu eingeführten Teilchen und Begriffe wird weiter unten in dieser Arbeit eingegangen. Ihre konkrete Benennung in der Physik erfolgte erst lange nach deren Entdeckung, hilft jedoch die Prozesse zu verstehen.

¹ Z ist die Anzahl der Protonen und A die Anzahl der Nukleonen (Protonen und Neutronen).

²Zum Photon vergleiche Abschnitt 5.4.3

3.2 Elektronenstrahlen

1897 zeigte JOSEPH JOHN THOMSON, dass die an einer Kathode austretende Strahlung, die sich durch elektromagnetische Felder ablenken lässt, aus den elementaren elektrischen Ladungsträgern besteht. Diese wurden nach dem altgriechischen Wort *élektron* für Bernstein, an welchem schon in der Antike elektrische Ladungen festgestellt wurden, *Elektronen* genannt. Das physikalische und chemische Formelzeichen für Elektronen ist e^- .

THOMSON entwarf nach seinen Entdeckungen 1903 das THOMSONSche Atommodell, in dem Atome aus positiv geladener Masse bestehen, in welcher sich verstreut Elektronen befinden. Das Modell wird auch „plumpudding“-Modell genannt, da sich nach THOMSONS Vorstellungen die Elektronen wie Rosinen im Kuchen in dem positiven Atom stecken [4].

Elektronen sind Elementarteilchen, das bedeutet, dass sie punktförmig und nicht weiter unterteilbar sind.

3.3 RUTHERFORDSches Atommodell

1911 beschloss der englische Atomphysiker ERNEST RUTHERFORD eine sehr dünne Goldfolie mit aus Heliumkernen bestehenden α -Strahlen und detektierte mit einem Szintillationsschirm, inwieweit diese Teilchen durch die Goldfolie abgelenkt werden. Erstaunlicherweise durchdringen die meisten α -Teilchen die Goldfolie, ohne abgelenkt zu werden. Nur wenige werden deflektiert.

RUTHERFORD schloss, dass das THOMSONSche Atommodell nicht korrekt sein konnte, da nach ihm die Teilchen in der Atommasse entweder alle „steckenbleiben“, sie durchdringen oder von ihr reflektiert werden sollten. Er entwarf sein eigenes Atommodell, in welchem das Atom zum größten Teil leer ist. In seiner Mitte befindet sich ein positiver *Atomkern*, welcher nach seinen Experimenten in der Größenordnung 10^{-14} m liegt. Um ihn herum schwirren die negativen Elektronen und bilden die *Atomhülle* mit einem Durchmesser von ca. 10^{-10} m.

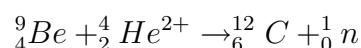
Das RUTHERFORDSche Atommodell wurde von BOHR (1913) und weiteren Naturwissenschaftlern dahingehend ergänzt, dass die Elektronen sich auf geordneten Orbitalen um den Atomkern bewegen [4, 6].

3.4 Nukleonen

Da die Masse der Atome nicht proportional zu ihrer Ordnungszahl ist, welche der Kernladung entspricht, müssen Atomkerne aus verschiedenen Teilchen bestehen. Diese werden nach dem lateinischen Wort „nucleus“ für Kern als *Nukleonen* bezeichnet.

1919 entdeckte RUTHERFORD das *Proton* als Kern des Wasserstoffatoms. Da dieses das erste im Periodensystem ist, wurde das Proton nach dem altgriechischen Wort *prótos* (das Erste) benannt. Das Formelzeichen des Protons ist p .

1932 wurde von JAMES CHADWICK, einem Schüler von RUTHERFORD, das *Neutron* als zweiter Kernbestandteil entdeckt. Er hatte bei einem Versuch, in dem er Beryllium mit Heliumkernen beschoss, verwunderlicherweise Kohlenstoff an Stelle von Bohrerzeugt:



Als „Abfallprodukt“ ergab sich Strahlung, welche sich als Neutronen herausstellte. Dieses Neutron wurde nach seiner elektrischen Neutralität benannt und hat das Formelzeichen n [4].

3.5 Übersicht

	Elektron	Proton	Neutron
Formelzeichen	e^-	p	n
Elektrische Ladung	$-e \approx -1.602 \cdot 10^{-19} C$	e	0 C
Masse [kg]	$m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31}$	$1,673 \cdot 10^{-27}$	$1,675 \cdot 10^{-27}$
Größe [m]	0	$\approx 1.7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\approx 1.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

Tabelle 1: Elektron, Proton und Neutron

Tabelle 1 fasst die Eigenschaften der Elektronen, Protonen und Neutronen zusammen.

4 Der Teilchenzoo

Wie sich im 20. Jahrhundert herausstellte, existieren weit mehr als die bis dahin bekannten Teilchen. Die Entdeckungen begannen mit Untersuchungen der kosmischen Strahlung und wurden nachher mit Blasenkammern und Teilchenbeschleuniger ausgeweitet. Es wurden wiederholt neue Teilchen gefunden oder Effekte beobachtet, für die es noch keine Erklärung gab.

Die Menge der neuen Teilchen wurde als *Teilchenzoo* bezeichnet.

- 1932 wies CARL ANDERSON in der kosmischen Strahlung ein Teilchen mit der Masse eines Elektrons, jedoch der entgegengesetzten Ladung nach. Dieses wurde **Positron** genannt und mit dem Symbol e^+ versehen.
- Neben Elektronen und Positronen fand ANDERSON weitere Teilchen in der kosmischen Strahlung mit positiver Ladung, jedoch einer wesentlich höheren Masse. Diese Teilchen sind heute als **Myonen** bekannt. Es gibt sie in positiver und negativer Ladung: μ^+ und μ^- . Sie zerfallen folgendermaßen:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{und} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

- Mit empfindlichem Fotomaterial wurde 1947 von CECIL POWELL das **Pion** gefunden. Dieses kommt geladen und ungeladen vor und zerfällt sehr schnell in geladene Myonen oder Photonen. Die Symbole sind π^+ , π^- und π^0 .
- 1951 wurde das **Kaon**, welches halb so schwer wie das Proton ist, in einer Nebelkammer gefunden. Es gibt sie geladen und neutral: K^+ , K^- und K^0 .
- Das **Lambda**, welches ebenfalls in der Nebelkammer gefunden wurde, ist $\frac{1}{5}$ schwerer als das Proton und neutral: Λ^0 .
- Nach der Entdeckung des Lambda wurde das **Xi** (Symbol: Ξ^-) gefunden, das folgendermaßen zerfällt:

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$$

- 1953 wurde das **Sigma** als letztes in der kosmischen Strahlung gefunden. In Beschleunigerexperimenten stellte sich heraus, dass es dieses Teilchen, welches rund 30% schwerer als ein Proton ist, in drei Ladungszuständen gibt: Σ^+ , Σ^- und Σ^0 .

- Das **Neutrino**, welches schon durch den β -Zerfall als Energieausgleich vorherzusehen war, wurde 1956 von FREDERICK REINES und CLADE COWAN nachgewiesen. Es ist sehr leicht und hat kaum Wechselwirkungen mit anderer Materie, weshalb es schwer zu detektieren ist.

Zu den meisten genannten Teilchen existieren auch *Antiteilchen*. Diese haben die entgegengesetzte Ladung, sonst jedoch die gleichen Eigenschaften. Treffen Teilchen und Antiteilchen aufeinander, löschen sie sich aus und es entsteht Energie in Form von γ -Strahlen [2, 4].

5 Das Standardmodell

Der Teilchenzoo wurde mit der Zeit immer unübersichtlicher, weshalb nach einem neuen Modell gesucht wurde, das sämtliche entdeckte Teilchen beschreibt. Hierzu wurde zwischen 1970 und 1973 das *Standardmodell der Elementarteilchenphysik* entwickelt. Es beschreibt alle Elementarteilchen wie auch ihre Wechselwirkungen³ untereinander mit Ausnahme der Gravitation.

Im Standardmodell haben die Elementarteilchen eine Reihe von Eigenschaften:

- Auf Grund der Grundkräfte werden den Teilchen **Ladungen** zugewiesen:
 - Die *Farbladung* beschreibt das Verhalten der starken Wechselwirkung.
 - Die *schwache Ladung* beschreibt die schwache Wechselwirkung.
 - Die *elektrische Ladung* oder einfach *Ladung* ist eine Eigenschaft der elektromagnetischen Wechselwirkung. Sie wird in Coulomb (C) gemessen.
- **Masse** ist die Eigenschaft der Materie, durch welche sie die vierte Wechselwirkung, die Gravitation, erfährt.

Masse wird in der Elementarteilchenphysik als Ruheenergie in Elektronenvolt (eV) oder als Masse in eV/c^2 gemessen⁴.

Das Elektronenvolt 1 eV ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen der Potentialdifferenz von 1 V gewinnt oder verliert⁵:

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

Durch EINSTEINS Äquivalenz von Masse und Energie $E = mc^2$ können Massen in eV/c^2 umgerechnet werden. Zum Vergleich gilt:

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}/c^2 = 1,783 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Auf die hier genannten Grundkräfte wird im Abschnitt 5.4 genauer eingegangen.

- **Quantenzahlen** beschreiben Zustände von Teilchen in der Quantenmechanik. Die im Standardmodell bedeutendste Quantenzahl ist der *Spin*. Er ist mit einem Drehmoment vergleichbar und kann halbzahlig, ganzzahlig, positiv, negativ oder 0 sein.

Weitere Quantenzahlen sind zum Beispiel *Isospin* und *Strangeness*.

³Als Wechselwirkungen gelten die 4 Grundkräfte der Physik: die starken und schwachen Kernkräfte, die elektromagnetische Kraft und die Gravitation.

⁴Hierbei ist $c \approx 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

⁵Zitat: Seite 314 [4].

- Viele instabile Teilchen haben eine begrenzte, durchschnittliche **Lebensdauer**, nach welcher sie in andere Teilchen zerfallen. Die Produkte haben dann geringere Massen.

Um einen Überblick zu gewinnen, werden die Teilchen in verschiedene Klassen eingeteilt:

- **Fermionen** sind Elementarteilchen mit halbzahligem Spin. Aus dem schon erwähnten Teilchenzoo gehören Elektronen, Positronen, Myonen und Neutrinos zu den Fermionen.
- **Bosonen** sind Elementarteilchen mit ganzzahligem Spin. Zum Beispiel ist das Photon ein Boson.
- **Hadronen** sind Teilchen, welche sich aus Quarks zusammensetzen, die zu den Fermionen zählen. Beispiele für Hadronen sind p , n , π , Σ und K .

5.1 Quarks

Zur Standardisierung der Teilchen wurden die *Quarks* zunächst theoretisch eingeführt. Der US-amerikanische Physiker MURRAY GELL-MANN erhielt für das Postulieren der Quarks 1969 den Nobelpreis für Physik.

Quarks sind die Elementarteilchen, aus welchen die Hadronen aufgebaut sind. Sie haben einen Spin von $\frac{1}{2}$ und gehören damit zu den Fermionen.

Name	Symbol	Generation	Ladung [e]	Masse [MeV]
Up	u	1	$+\frac{2}{3}$	4
Down	d	1	$-\frac{1}{3}$	7
Charme	c	2	$+\frac{2}{3}$	1300
Strange	s	2	$-\frac{1}{3}$	150
Top	t	3	$+\frac{2}{3}$	174000
Bottom	b	3	$-\frac{1}{3}$	4500

Tabelle 2: Quarks

Tabelle 2 liefert einen Überblick über die Quarks [5].

Quarks haben elektrische Drittellladung, was damit zusammenhängt, dass ein Proton aus 3 Quarks besteht, deren Ladungen sich zu 1 ergänzen.

Zu jedem Quark gibt es Antiteilchen wie zu den anderen Elementarteilchen. Diese sind \bar{u} , \bar{d} , \bar{c} , \bar{s} , \bar{t} und \bar{b} .

Um die Materie auf der Erde zu beschreiben, genügen eigentlich *Up*- und *Down*-Quarks. Da sich hiermit jedoch nicht alle gefundenen Teilchen wie z.B. Σ^+ , Σ^- und Σ^0 erklären ließen, wurde das *Strange*-Quark als drittes eingeführt.

Als Gegenstück zum Strange-Quark ergab sich das *Charm*-Quark, welches 1974 erstmals experimentell nachgewiesen wurde.

Dies sind Quarks der *zweiten Generation*, welche instabil sind und nach einer Weile in andere Quarks der *ersten Generation* (u und d) zerfallen.

Quarks zerfallen auf Grund der schwachen Wechselwirkung im Betazerfall auch in Quarks der gleichen Generation. So zerfällt ein Up-Quark beispielsweise in ein Down-Quark, ein Elektron und ein Neutrino:

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

Ähnlich zerfallen Charm und Top in Strange und Bottom.

Als 1977 ein *Ypsilon-Meson* (Y) entdeckt wurde, musste eine weitere, *dritte Generation* von Quarks eingeführt werden, da in dem Teilchen ein *Bottom-Quark* stecken musste. Das *Top-Quark* wurde als Gegenstück zum Bottom-Quark eingeführt und 1977 experimentell nachgewiesen.

Die Quarks werden mit jeder Generation schwerer und instabiler. Das Top-Quark ist bereits so schwer, wie ein Gold-Atom und „lebt“ nicht lange genug, um mit anderen Quarks ein Hadron zu formen.

Ob es noch weitere Quark-Generationen gibt, ist noch unbekannt, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Da diese Quarks noch instabiler und schwerer wären als die der dritten Generation, müssten zur Erzeugung noch höhere Energien als zuvor verwendet werden [3–5].

5.2 Leptonen

Die *Leptonen* bilden zusammen mit den Quarks die Gruppe der Fermionen. Zu den Leptonen ihnen zählen z.B. das Elektron, das Myon wie auch das Elektron-Neutrino, welches bisher nur als Neutrino bezeichnet wurde. Es gibt weitere Neutrinos.

Name	Symbol	Generation	Ladung [e]	Masse [MeV]
Elektron	e^-	1	-1	0, 511
Elektron-Neutrino	ν_e	1	0	$< 3 \cdot 10^{-6}$
Myon	μ^-	2	-1	105, 6
Myon-Neutrino	ν_μ	2	0	< 0.19
Tau	τ^-	3	-1	1777
Tau-Neutrino	ν_τ	3	0	< 18

Tabelle 3: Leptonen

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Leptonen [5].

Alle Leptonen haben einen Spin von $-\frac{1}{2}$. Zu jedem Lepton gibt es, wie zu den Quarks, Antiteilchen: e^+ , $\bar{\nu}_e$, μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$, τ^+ , $\bar{\nu}_\tau$.

Die Leptonen lassen sich, wie die Quarks, in 3 Generationen einteilen. Das *Myon* μ^- und das *Tau* τ^- sind die Gegenstücke des Elektrons in der zweiten und dritten Generation. e^- , μ^- und τ^- haben jeweils ein entsprechendes Neutrino.

Das instabile Myon zerfällt nach $1, 197 \cdot 10^{-6}$ s durch die schwache Wechselwirkung, die weiter unten beschrieben wird. Wegen der hohen Masse des Tau kann es als einziges Lepton auch in Quarks zerfallen, welche direkt Hadronen bilden.

Die Neutrinos haben kaum Wechselwirkungen mit Materie, weshalb sie schwerer zu detektieren sind als die anderen Elementarteilchen [5].

	Generation 1	Generation 2	Generation 3
Quarks	Up (u)	Charm (c)	Top (t)
	Down (d)	Strange (s)	Bottom (b)
Leptonen	Elektron-Neutrino (ν_e)	Myon-Neutrino (ν_μ)	Tau-Neutrino (ν_τ)
	Elektron (e^-)	Myon (μ^-)	Tau (τ^-)

Tabelle 4: Fermionen

Die bis hier eingeführten Elementarteilchen, die Fermionen, lassen sich zusammengefasst darstellen, wie in Tabelle 4 gezeigt.

5.3 Zusammensetzung der Hadronen

Hadronen lassen sich aus 2 oder 3 Quarks zusammensetzen. Hadronen aus einem Quark und einem Antiquark heißen *Mesonen*. Hadronen aus 3 (Anti-) Quarks heißen (*Anti-*) *Baryonen*.

Name	Zusammensetzung	Masse [MeV/c ²]	häufige Zerfallsprodukte
Baryonen - Nukleonen			
Neutron	$n = (udd)$	939,565	$p + e^- + \bar{\nu}_e$
Proton	$p = (uud)$	938,272	stabil
Baryonen - Hyperonen			
Lambda	$\Lambda^0 = (uds)$	1115,6	$p + \pi^-, n + \pi^0$
Sigma	$\Sigma^- = (dds)$	1197,4	$n + \pi^0$
	$\Sigma^0 = (uds)$	1192,6	$\Lambda^0 + \gamma$
	$\Sigma^+ = (uus)$	1192,6	$p + \pi^0, n + \pi^-$
Xi	$\Xi^- = (dss)$	1321,3	$\Lambda^0 + \pi^-$
	$\Xi^0 = (dss)$	1321,3	$\Lambda^0 + \pi^0$
Mesonen			
Pion	$\pi^- = (d\bar{u})$	139,57	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$
	$\pi^0 = (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	134,96	$\gamma + \gamma$
	$\pi^+ = (u\bar{d})$	139,57	$\mu^+ + \nu_\mu$
Kaon	$K^- = (s\bar{u})$	493,7	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$
	$K^0 = (d\bar{s})$	493,7	$\pi^- + \pi^+$
	$K^+ = (u\bar{s})$	493,7	$\mu^+ + \nu_\mu$

Tabelle 5: Hadronen

Tabelle 5 zeigt die Zusammensetzung der bis jetzt genannten Hadronen.

Bei dem neutralen Pion bedeutet $(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$, dass der Quantenzustand zwischen den beiden Seiten pendelt.

Aus dem Modell ergibt sich rein theoretisch die Existenz vieler weiterer Hadronen, von denen mehrere schon experimentell gefunden wurden, die jedoch nicht in der Tabelle aufgeführt sind [5].

5.4 Kräfte und Austauschteilchen

Neben den oben genannten Elementarteilchen behandelt das Standardmodell der Elementarteilchenphysik 3 der 4 Grundkräfte, welche zwischen den Teilchen wirken:

- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung
- Elektromagnetische Wechselwirkung

Die Gravitation wird in diesem Modell nicht behandelt, worauf in Abschnitt 5.4.4 genauer eingegangen wird.

Im Standardmodell werden die Wechselwirkungen durch Austauschteilchen beschrieben. Dies sind Elementarteilchen, die von den betroffenen Teilchen abgegeben und wieder aufgenommen werden. Austauschteilchen haben einen Spin von 1, womit sie zu den *Bosonen* gehören.

Im Folgenden werden diese Kräfte sowie die mit ihnen zusammenhängenden Ladungen und Austauschteilchen näher erläutert.

5.4.1 Die starke Wechselwirkung: Gluonen

In den Atomkernen, welche aus Protonen und Neutronen bestehen, sind die elektrisch gleich geladenen Protonen sehr nahe beieinander, obwohl sich gleichnamige elektrische Ladungen abstoßen. Selbst die in den Protonen befindlichen Quarks müssten sich auf Grund der elektromagnetischen Wechselwirkung abstoßen.

Da dies jedoch nicht geschieht, muss es eine Kraft geben, welche die Nukleonen und die Atomkerne zusammenhält. Dies ist die *starke Kernkraft* (auch *starke Wechselwirkung*). Sie wirkt zwischen den Quarks und stellt hierdurch indirekt auch den Zusammenhalt der Nukleonen sicher. Sie ist die stärkste der 4 Wechselwirkungen, weshalb ihre relative Stärke auf 1 gesetzt wurde. Sie ist auch die Wechselwirkung mit der geringsten Reichweite von ca. 10^{-15} m.

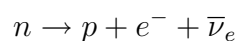
Um die Kraft näher zu beschreiben, werden den Elementarteilchen, die von ihr betroffen sind, *Farbladungen* zugeteilt. Die Ladungen sind rot, grün und blau. Zusammen ergeben sie die Farbe Weiß (Ladung 0), wie bei der additiven Farbmischung. Die Farben der Antiteilchen sind nach den Komplementärfarben (additive Mischung!) benannt: antirot = cyan, antigrün = magenta und antiblau = gelb. Jedes Quark und jedes Antiquark hat genau eine Farbladung. In jeder Kombination von Quarks in Hadronen ergibt die Summe der Farbladungen immer weiß. Die Farbladungskräfte sind so stark, dass Antiteilchen erzeugt werden, damit einzelne Farbladungen wieder zu weißen Teilchen ergänzt werden. Dass die Teilchen mit einzelnen Farbladungen nicht separiert werden können, wird in der Teilchenphysik als *Confinement* bezeichnet.

Das Austauschteilchen der starken Kraft ist das *Gluon* (von englisch „glue“: Kleber) mit dem Symbol g . Mit dem Spin von 1 gehört es zu den Bosonen und wird von keiner weiteren Kraft beeinflusst, ist also elektrisch neutral und hat keine Ruhemasse. Auch die Austauschteilchen der starken Kraft tragen Farbladungen. Wenn ein Gluon von einem Quark emittiert wird, ändert es seine Farbladung entsprechend. Hierzu gibt es 8 verschiedene Gluonen: 6 gehören zu den verschiedenen Farbänderungen und die anderen 2 werden benötigt, um Austauschteilchen zu beschreiben, die keine Farbänderung hervorrufen.

Wenn ein Gluon in einem Baryon (3 Quarks) ausgesendet wird, wechselt es von einem Quark zu einem anderen, bei welchem es die entgegengesetzte Farbänderung des emittierenden Quarks bewirkt, wodurch die Mischfarbe weiß im Baryon erhalten bleibt. Wird in einem Meson (1 Quark, 1 Antiquark) ein Gluon ausgetauscht, bewirkt dies eine Farbänderung des empfangenden Teilchens zum Farbkomplement des emittierenden, sodass auch hier die Mischfarbe weiß erhalten bleibt [4, 5].

5.4.2 Die schwache Wechselwirkung

Die *schwache Wechselwirkung* (auch schwache Kraft) wirkt sowohl auf Quarks wie auch auf Leptonen. Sie ist beispielsweise dafür verantwortlich, dass im β -Zerfall ein Neutron in ein Proton und ein Neutrino umgewandelt wird:



Sie ist, wie ihr Name schon sagt, wesentlich schwächer als die starke Wechselwirkung. Ihre relative Stärke liegt bei 10^{-13} . Sie wirkt wie die starke Kraft nur über sehr kleine Distanzen von 10^{-18} m.

Die Austauscheteilchen der schwachen Kraft sind das neutrale *Z-Boson* (Z) und die geladenen *W-Bosonen* (W^+ und W^-). Im Gegensatz zur starken Wechselwirkung sind diese Austauscheteilchen massiv, mit Massen von $80 \text{ GeV}c^{-1}$ (W-Bosonen) und $91 \text{ GeV}c^{-1}$ (Z-Boson).

Beim Zerfall eines Neutrons wird ein down-Quark in ein up-Quark umgewandelt. Hierbei wird zunächst ein Austauscheteilchen erzeugt. Das nur sehr kurzlebige W^- zerfällt wiederum schnell in ein Elektron und ein Antineutrino:

$$d^{-\frac{1}{3}} \rightarrow u^{+\frac{2}{3}} + W^- \text{ und } W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

Bei allen Wirkungen der schwachen Kraft nehmen 4 Fermionen teil. Prozesse zwischen Leptonen werden *leptonische Prozesse* genannt. Beispielsweise zerfällt ein Tau in ein Elektron und zwei Neutrinos:

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e$$

Ähnlich zerfällt ein Tau in ein Myon und zwei Neutrinos wie auch ein Myon in ein Elektron und zwei andere Neutrinos zerfällt. In *Streuprozessen* treffen zwei Fermionen aufeinander und verwandeln sich durch Austausch eines Z-Bosons in andere Fermionen:

$$\tau^- + \bar{\nu}_\mu \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\tau$$

Vergleichbare Prozesse finden wiederum beim Zerfall von Myonen statt.

Ähnlich finden *hadronische Prozesse* zwischen Hadronen statt. So zerfällt ein Kaon durch ein W-Boson in zwei Pionen⁶:

$$\bar{s} \rightarrow u + \bar{u} + \bar{d} \text{ oder } K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

Wie bereits erwähnt, kann das Tau als einziges Lepton in Quarks zerfallen. Dies geschieht durch den Austausch eines W^- :

$$\tau \rightarrow \bar{\nu}_\tau + \bar{u} + d$$

Bei all diesen Prozessen sind die Summen der Ladungen vor, nach und während des Prozesses gleich [3, 5].

5.4.3 Elektromagnetismus, Photonen und das Licht

Elektrische Ladungen sowie das elektrische Feld sind seit dem 18. Jahrhundert bekannt. CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB entwickelte 1785 das nach ihm benannte Gesetz, welches die Kräfte zwischen geladenen Körpern beschreibt.

Magnete sind schon wesentlich länger bekannt. Jedoch konnte erst nach der „Entdeckung“ des elektrischen Stroms das magnetische Feld genauer untersucht werden.

1820 stellte CHRISTIAN OERSTEDT eine Verbindung zwischen elektrischen und magnetischen Feldern fest. Das resultierende Zusammenspiel von Kräften wird als Elektromagnetismus bezeichnet.

Bei der Untersuchung von Licht stellte GEOFFREY INGRAM TAYLOR fest, dass Licht in einzelnen Paketen, den *Photonen*, auf eine Oberfläche trifft. Aus der Bildung

⁶Vergleiche Tabelle 5 zur Zusammensetzung der Hadronen.

von Interferenzmustern bei Licht folgte jedoch, dass das Licht neben diesen Teilchen auch Welleneigenschaften hat. Dies wird als *Welle-Teilchen-Dualismus* bezeichnet [4].

Die elektromagnetische Kraft wird in der Teilchenphysik auch als *elektromagnetische Wechselwirkung* bezeichnet. Ihr Austauschteilchen ist das Photon γ , welches schon bei der Radioaktivität beobachtet wurde. Die elektromagnetische Wechselwirkung ist mit einer relativen Stärke von 10^{-2} die zweitstärkste Kraft und reicht unendlich weit. Diese masse- und ladungslosen Photonen werden auf vielerlei Weisen erzeugt. Elektronen können Photonen emittieren und absorbieren:

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma \text{ und } e^- + \gamma \rightarrow e^-$$

Dies ist vor allem bei der Änderung der Energieniveaus von Elektronen in Atomen und Molekülen zu beobachten.

Treffen ein Teilchen und ein Antiteilchen wie ein Elektron und ein Positron oder ein up- und ein anti-up-Quark in einem neutralen Pion aufeinander, so vernichten sich diese und es entsteht Energie in Form eines Photons:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma \text{ und } \pi^0 = u + \bar{u} \rightarrow \gamma$$

Bei all diesen Prozessen spielt die Energieerhaltung eine wichtige Rolle. So wird bei der Kollision zweier schwerer Quarks ein Photon mit weit höherer Energie als bei der Kollision von e^- und e^+ erzeugt. Wenn ein Photon auf Materie trifft, kann es zur Paarerzeugung kommen: Teilchen und Antiteilchen werden erzeugt. Hierbei wird die Energie des Photons in die Masse der erzeugten Teilchen und deren Bewegungsenergie umgesetzt [4, 5]:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

5.4.4 Gravitation

Die *Gravitation* ist die vierte und letzte Grundkraft der Physik. Sie bewirkt eine gleichmäßige Anziehung aller massiven Teilchen.

Die Gravitation wurde zunächst 1686 von ISAAC NEWTON durch das nach ihm benannte *Gravitationsgesetz* beschrieben. 1916 beschrieb ALBERT EINSTEIN die Gravitation in der *allgemeinen Relativitätstheorie* als Eigenschaft der gekrümmten Raumzeit [4].

In der Quantentheorie wird diese Wechselwirkung durch Austauschteilchen beschrieben - den bisher noch nicht nachgewiesenen *Gravitonen*. Diese müssten selber masselos sein und sich nicht von den anderen Wechselwirkungen beeinflussen lassen.

Nach EINSTEIN hängt die Gravitation direkt mit Raum und Zeit zusammen. Es gibt derzeit noch keine schlüssige Theorie, welche das Standardmodell mit der Gravitation vereint [3].

5.5 Noch einmal Masse: Higgs-Bosonen

Das bis hierhin vorgestellte Standardmodell beschreibt die Interaktionen der Elementarteilchen mit Ausnahme der Gravitation. Rein mathematisch müssten die einzelnen Elementarteilchen hierzu jedoch masselos sein. Da dies offensichtlich nicht der Fall ist, wurde eine neue Theorie geschaffen, um das Phänomen „Masse“ zu erklären.

1964 entwickelte PETER HIGGS hierzu den nach ihm benannten *Higgs-Mechanismus*. In seiner Theorie sind jegliche massebehafteten Teilchen von *Higgs-Bosonen* begleitet.

Dieses neue Boson konnte bis dato nicht nachgewiesen werden. Wissenschaftler hoffen jedoch, es bald durch immer höhere Energien in Teilchenbeschleunigern künstlich produzieren zu können [5].

6 Ausblick

Das hier vorgestellte Standardmodell erklärt viele der in Teilchenbeschleunigern beobachtbaren Reaktionen zwischen Elementarteilchen. Wie jedoch schon erläutert, gibt dieses Modell keinen Aufschluss über die vierte Wechselwirkung, die Gravitation. Hierzu wird nach einer neuen Theorie gesucht, welche die bisherige mit der Gravitation vereint. Ansätze hierzu sind:

- **Quantengravitation:** Ein quantentheoretischer Ansatz, die Gravitation zu beschreiben und mit dem Standardmodell in Verbindung zu bringen.
- **Stringtheorie:** Die elementaren Bestandteile der Materie sind keine Teilchen, sondern schwingende Punkte mit Welleneigenschaften.

In der Forschung werden größere Teilchenbeschleuniger gebaut, von welchen man sich neue Aufschlüsse über den Aufbau der Materie erhofft. Der mit einem Umfang von 27 km derzeit größte Beschleuniger LHC (Large Hadron Collider) wird am CERN in Genf gebaut und soll dieses Jahr in Betrieb genommen werden. Für weitere Informationen siehe [1].

Literatur

- [1] CERN EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH, <http://cern.ch>: *CERN Web Pages*.
- [2] CLOSE, FRANC, MICHAEL MARTEN und CHRISTINE SUTTON: *Spurensuche im Teilchenzoo: Die elementaren Bausteine der Materie*. 1989.
- [3] FRITZSCH, HARALD: *Elementarteilchen Bausteine der Materie*, Band 2346 der Reihe *Wissen*. Verlag C. H. Beck oHG, München, 2004.
- [4] GREHN, JOACHIM und JOACHIM KRAUSE: *Metzler Physik*. Bildungshaus Schulbuchverlage Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH, 3. Auflage, 2006.
- [5] SCHWARZE, DR. HEINER, MATTHIAS FÖRSTER, KARSTEN RINCKE und OLIVER THOMSEN: *Unterrichtsmaterialien zum TESLA-Projekt, Teil 2: Elementarteilchenphysik*. Aulis Verlag Deubner, 2001.
- [6] WEIDL, ERHARD: *Physik. Atom- und Kernphysik. Dualismus Welle-Teilchen, Atommodelle, Radiaktivität, Kernenergie.*, Band 667 der Reihe *Mentor Abitur Hilfe*. Mentor Verlag Dr. Ramdohr KG, München, 5. Auflage, 2003.